

VŠB -Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Modelování provozních stavů akumulátorových
lokomotiv s cílem optimalizace spotřeby**
**Simulation of Operating States for Accumulator
Engines Aim at Optimization of Consumption**

2012

Bc. Tomáš Kupec

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Kupec**

Studijní program: **N2649 Elektrotechnika**

Studijní obor: **2612T015 Elektronika**

Téma: **Modelování provozních stavů akumulátorových lokomotiv s cílem optimalizace spotřeby**
Simulation of Operating States for Accumulator Engines Aim at Optimization of Consumption

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte průzkum současného stavu akumulátorových lokomotiv.
2. Vytvořte simulační model spotřeby energie akumulátorové lokomotivy
3. Implementujte skutečné drážní profily do simulačního modelu.
4. Proveďte komparaci spotřeby pro jednotlivé jízdní profily.
5. Navrhněte metodiku optimalizace spotřeby energie akumulátorových lokomotiv.

Seznam doporučené odborné literatury:

- Křupka, J., Kašparová, M.: Modelování v kostce pro Matlab a Simulink, Univerzita Pardubice 2009.
- Dub, M.: Modelování a simulace elektrických pohonů v programu MATLAB – Simulink, Univerzita obrany, Brno 2010.
- Kupka, L.: Matlab & Simulink : úvod do použití, Lanškroun 2007.
- Zaplatílek, K., Doňar, B.: MATLAB pro začátečníky, Praha: BEN 2005.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Vaculík**

Datum zadání: 19.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vykonal samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal“

V Ostravě dne 4.5.2012

.....
K. P. Rozs

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D. za jeho trpělivost, čas a ochotu poskytnout mi rady a připomínky v celém průběhu vypracování mé diplomové práce.

Mé poděkování patří také firmě DODÁVKY AUTOMATIZACE spol. s r. o., která mi poskytovala cenné informace během vypracování mé diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá modelování provozních stavů akumulátorových lokomotiv s cílem optimalizace spotřeby. Součástí práce je vytvoření simulačního schématu v programu MATLAB® Simulink®, který nám slouží k porovnání spotřeby pro různé druhy vybraných akumulátorových lokomotiv. V simulačním programu se nastavují jak proměnné hodnoty lokomotivy, tak i trakční charakteristiky. Výstupem jsou žádané a skutečné hodnoty energie, výkonu, dráhy, rychlosti a jiných parametrů. Tyto výstupní hodnoty můžeme mezi sebou libovolně porovnávat. Diplomová práce je také inspirována vlastním teoretickým i praktickým řešením, který má za úkol optimalizovat spotřebu, čili ji snížit a zároveň ji využít k dalšímu provozu na trati.

Klíčová slova

Akumulátorová lokomotiva, akumulátorová baterie, trakční pohon, odporové síly, hnací síly, tažné síly, hnací dvojkolí, aerodynamický koeficient, válivé tření, moment setrvačnosti motoru, moment setrvačnosti kola, celková účinnost převodovky, převodový poměr.

Abstract

My thesis deals with modeling of operating conditions of battery locomotives in order to optimize consumption. One part of my work is a diagram of the simulation in MATLAB ® Simulink ® program, which allow us to compare the consumption of the different types for the selected battery locomotives. The simulation program can be set as variables locomotives and traction characteristics. The output is desired and actual values of energy, power values, tracks, speed and other parameters. These output values can be compared with each other freely. The thesis is also inspired by own theoretical and practical solution that is designed to optimize consumption, to reduce it and also use it for further use on the track.

Keywords

Accumulator engine, Accumulator batterie, Traction drive, Resistance forces, The driving force, Traction, Drive axle, The aerodynamic coefficient, Rolling friction, Moment of inertia, Moment of inertia of the wheels, The overall efficiency of the gearbox, The gear ratio.

Seznam symbolů

VELIČINA	POPIS	ROZMĚR
a	zrychlení lokomotivy	$[\text{m.s}^{-2}]$
C_x	aerodynamický koeficient	$[-]$
F_{Al}	síla potřebná k překonání odporu jednoho kola	$[\text{N}]$
F_h	hnací síla	$[\text{Nm}]$
F_o	síla jízdních odporů	$[\text{N}]$
F_{oa}	aerodynamický odpor	$[\text{N}]$
F_{ob}	brzdný odpor	$[\text{Nm}]$
F_{or}	přídavný odpor z oblouku	$[\text{Nm}]$
F_{oz}	odpor zrychlení	$[\text{N}]$
F_{ovt}	válivé tření kola po kolejnici	$[\text{N}]$
F_s	odpor stoupání	$[\text{N}]$
F_t	tažná síla na obvodě hnacích kol	$[\text{Nm}]$
g	gravitační zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
G	tíha lokomotivy	$[\text{N}]$
G_l	část tíhy vozidla, připadající na jedno kolo	$[\text{N}]$
h	výška stoupání tratě	$[\text{m}]$
i_{celkovy}	celkový převodový poměr	$[-]$
J	setrvačný moment pracovního mechanismu	$[\text{kg.m}^2]$
J_{kola}	moment setrvačnosti kola	$[\text{kg.m}^2]$
J_{motoru}	moment setrvačnosti motoru	$[\text{kg.m}^2]$
k	součinitel rotujících hmot	$[-]$
l	délka tratě	$[\text{m}]$
m	hmotnost lokomotivy	$[\text{kg}]$
M_{kola}	moment kola	$[\text{Nm}]$
Mm	mechanický moment	$[\text{Nm}]$
Mpm	moment pracovního mechanismu	$[\text{Nm}]$
$Mred$	redukovaný moment na hřídel motoru	$[\text{Nm}]$
$Mstat$	statický moment	$[\text{Nm}]$
n	počet náprav vozidla	$[-]$
r	poloměr čepu nápravy	$[\text{m}]$
r_{kola}	poloměr kola	$[\text{m}]$
s	sklon vozovky (stoupání)	$[-]$
S	čelní plocha lokomotivy	$[\text{m}^2]$
u_{prev}	účinnost převodovky	$[\%]$
v	rychlost lokomotivy vpřed	$[\text{m.s}^{-1}]$
v_0	rychlost protivětru	$[\text{m.s}^{-1}]$

VELIČINA	POPIS	ROZMĚR
α	úhel stoupání	[rad, °]
ζ	koeficient válivého tření	[-]
ρ	měrný trakční odpor	[-]
ρ_0	měrný jízdní odpor	[-]
ρ_A	měrný odpor z tření v ložiskách	[-]
ρ_{vz}	hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
φ	součinitel tření v ložiskách	[-]
ω_k	úhlová rychlost kola	[rad.s ⁻¹]

Seznam zkratk

ZKRATKA	POPIS
MAGLEV	Magnetic levitation
NiCd	Nikl-kadmiový akumulátor
Pb	Olověný akumulátor
DM	Dieselový motor
TM	Trakční motor
G	elektrický generátor
B	Akumulátorová baterie
S	Setrvačník
TE 015E (TE015)	Typ trakčního motoru
EDB	Electrodynamic brake - elektrodynamická brzda
GTO tyristor	Gate turn off - hradlem vypínatelná součástka
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem

Obsah

Úvod.....	10
1. Teoretická část	12
1.1 Historie prvních akumulátorových lokomotiv.....	12
1.2 Současné akumulátorové lokomotivy.....	13
1.2.1 Koncepce fotovoltaického napájení kolejového vozidla.....	13
1.2.2 Akumulátorová elektrická lokomotiva 710.201-5 - ARCELORMITTAL.....	14
1.2.3 Minibus s elektrickým pohonem ZEUS M 200 EVOLUTION.....	15
1.2.4 ŠKODA 25 Tr IRISBUS	15
1.2.5 Vlaky na principu magnetické levitace	16
1.3 Nekonenční lokomotivy na našich kolejích.....	17
1.3.1 Akumulátorová lokomotiva.....	17
1.3.2 Hybridní lokomotiva	18
1.3.3 Nezávislá elektrická trakce.....	18
1.3.4 Závislá elektrická trakce.....	20
1.4 Fyzikální popis	22
1.4.1 Trakční odpory	24
1.4.2 Tažná síla	31
1.4.3 Charakteristiky lokomotiv	32
2. Praktická část	34
2.1 Matlab.....	34
2.2 Model spotřeby energie akumulátorové lokomotivy	35
2.2.1 Profil tratě akumulátorové lokomotivy	36
2.2.2 Model akumulátorové lokomotivy	37
2.2.3 Blok volby zobrazovaných charakteristik	45
2.2.4 Zobrazení charakteristik.....	46
2.3 Akumulátorová elektrická lokomotiva 710.201-5 (CS 110A).....	47
2.4 Kapotová čtyřnápravová posunovací lokomotiva 730.....	50
2.5 Akumulátorová lokomotiva A219.0.....	52
2.6 Energetická bilance provozu kolejového vozidla	54
2.7 Návrh optimalizace spotřeby akumulátorové lokomotivy	56
2.8 Porovnání energií (bez optimalizace a s optimalizací)	58
2.9 Grafické porovnání výsledků bez optimalizace a s optimalizací.....	61

3. Experimentální výsledky	65
Závěr	68
LITERATURA	70
SEZNAM OBRÁZKŮ	73
SEZNAM TABULEK	74
SEZNAM GRAFŮ	75
PŘÍLOHY	75

Úvod

V první polovině osmdesátých let se ukázalo, že provoz klasické motorové posunovací lokomotivy je neefektivní, a to hlavně díky dlouhým prostojím lokomotiv při běžícím motoru a také kvůli minimálnímu využívání plného výkonu lokomotivy. Tyto důsledky vedly k vývoji lokomotivy s novým zdrojem energie. Vývoj byl zahájen v podniku ČKD Praha v polovině osmdesátých let. První prototyp dvouzdrojové lokomotivy vyjel v roce 1986. [33]

Z historie železniční dopravy jsou známy snahy řešit nekonvečním způsobem problémy jak s pohonem, tak i s ekonomikou provozu železničních vozidel. Prvním řešením je spojení lokomotivy se služebním vozem, který má za následek zlevnění provozu parních vlaků známých jako parní vozy Elbel – Gölsdorf. Podobně to bylo i při spojení parního stroje a osobního vozu Ringhofferovou továrnou. Při spojení těchto řešení, kde se nahradil parní stroj motorem spalovacím, vznikly o mnoho let později velké motorové vozy. V dnešní konstrukci lokomotiv se uplatňuje spojení dvounápravové a jednopodvozkového vozu. Elektrizace trati je velice nákladnou záležitostí, proto byla zkonstruována první elektrická akumulátorová lokomotiva (Křížův vůz, který byl zkoušený na trati Nusle – Měchenice).

Je třeba si připomenout fakta, že prvním automobilem, který překonal rychlost 100 km/h, byl elektromobil poháněný baterií. Zatím co akumulátorová lokomotiva je díky historii vnímána jako něco archaického, co již bylo dávno překonáno, hybridní automobil nebo elektromobil jsou vnímány jako vozidlo budoucnosti. Přitom fyzikální zákony o akumulaci energie hovoří zcela opačně. [5]

Závislost na ropě

Co se týče ropy, stejně jako uhlí, nezáleží nám, zdali jsou na desítky nebo stovku let, ale podstatná je ta skutečnost, že tyto zásoby jsou stejně jako u uhlí konečné a neobnovitelné. Doprava, kde spadá i železniční, je na ropě silně závislá. Proto musíme hledat cesty na snížení energetické náročnosti vozidel a závislosti na ropě. Snižování energetické náročnosti přináší i další pozitivní efekt, jako je například snižování emisí, čímž se chrání životní prostředí. Snížení energetické náročnosti je jednou z hlavních cest pro snižování závislosti na ropě. Druhou cestou je využívání pohonů, které nejsou na ropě závislé. Hovoří se hlavně o akumulátorových nebo elektrických vozidlech. [5]

Nejvyšší úspory

Lokomotiva v posunovacím režimu využívá v provozu svůj maximální výkon, který má k dispozici, jen minimálně. Podrobná měření uvádějí, že v posunovacím režimu využívá kolem 1% práce plným výkonem z celkové práce motoru a střední použitý výkon pak dosahuje 10% až 20% instalovaného výkonu. Tato fakta nelze měnit a ani není dobré snižovat výkon motoru. Z toho důvodu byly, jsou a budou stále hledány cesty, jak zlepšit energetickou bilanci lokomotiv v posunovacím režimu. Jednou z nich je použití nekonvenčních zdrojů energie pohonu lokomotiv. Do faktorů, které nepříznivě ovlivňují energetickou bilanci konvenčních motorových lokomotiv, patří vysoká spotřeba chodu naprázdno, vysoká spotřeba při zatížení nízkým výkonem a ztráty pohybové energie při brzdění třecími brzdami. Ke snížení spotřeby při nízkých výkonech a volnoběhu je vhodné použít menšího, nejlépe automobilového motoru a k využití pohybové energie (rekuperační brzdění) je nutno instalovat na vozidle akumulátor. Tím byly dány dva „nové“ komponenty pro pohon lokomotiv. [5]

Současný stav problematiky

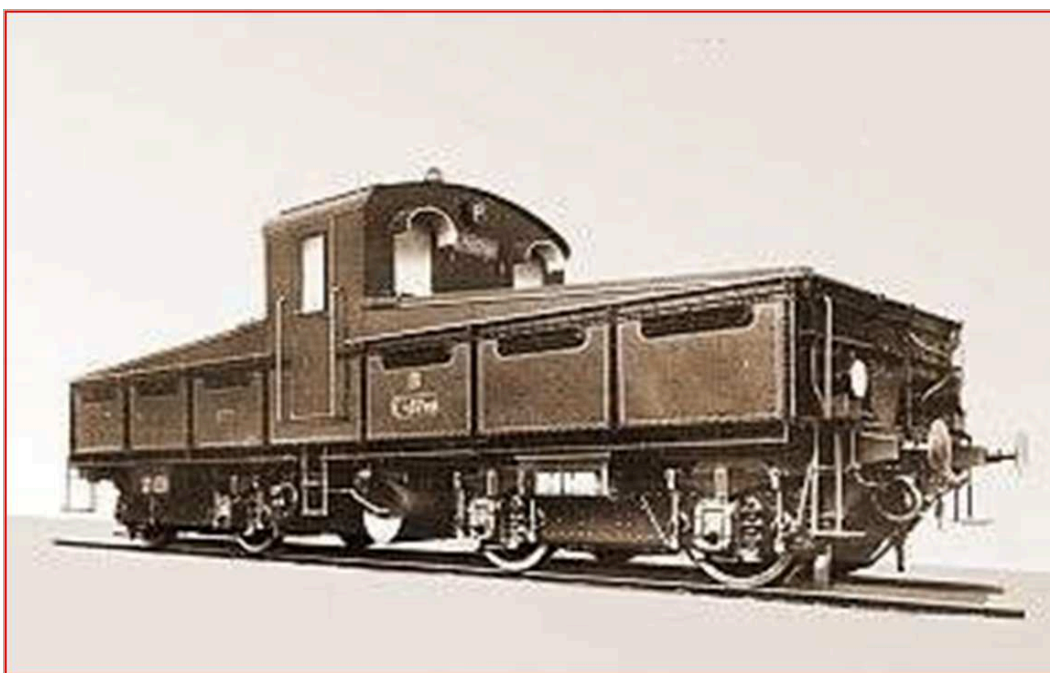
Základním problémem energetické účinnosti řízení vlaků byl formulován a řešen v mnohých člancích diskutujících na toto téma, jež se objevily v průběhu devadesátých let. Typ optimální strategie, který se skládá ze čtyř po sobě jdoucích kontrolních úrovní (plný výkon, držení otáček, doběh a plné brzdění), byl představen Howlettem. Howlett uvažoval trať s nenulovým sklonem. Oba tyto předpoklady byly převzaty od Chenga a Khmelniťského. Howlett a Pudney shrnuli výše uvedené výsledky. Tento teoretický základ umožnil vývoj výpočetních systémů (např. Metromiser a Freightmiser) pro výpočet efektivního řízení strategie, které byly úspěšně realizovány v době městských a dálkových vlaků.

Mnohá tvrzení se zabývají energetickou účinností kontroly vlaku a jeho modifikací optimální strategie pomocí výpočtů spínacích časů a analýzou založenou na matematických nástrojích nelineárního programování. Cílem je minimalizovat funkci s ohledem na systém diferenciálních rovnic elektrické energie a krajních podmínek. Záměr je kladen na minimalizaci spotřeby elektrické energie a času jízdy s předepsanou hmotností. Výsledky prezentované Howlettem v předchozích řádcích byly více či méně založeny na použití numerických metod pro řešení problémů a optimálního řízení. V určení spotřeby energie hrají velkou a častou úlohu tachogramy znázorňující průběh jízdy v závislosti na čase. [1]

1. Teoretická část

1.1 Historie prvních akumulátorových lokomotiv

První elektrickou akumulátorovou lokomotivu řady E 407.001, která sloužila pro posun na nezatrolejovaných kolejích, dodala do Pražských nádraží v květnu 1926 firma Křižík. V roce 1928 byla dodána lokomotiva E 407.002 (firma ČKD). Lokomotiva měla shodnou mechanickou část s lokomotivou Křižíkovou. Škoda se také podílela na vývoji akumulátorových lokomotiv a roku 1931 dodala dva kusy řady E 417.0. Tyto lokomotivy byly vyřazeny z provozu v roce 1962. Ale v roce 1943 dodala firma Škoda další dvě akumulátorové lokomotivy řady E 416.0 a dalších osm lokomotiv této řady bylo dodáno v letech 1947 – 1949. Tato řada zanikla rovněž v roce 1966. [15]



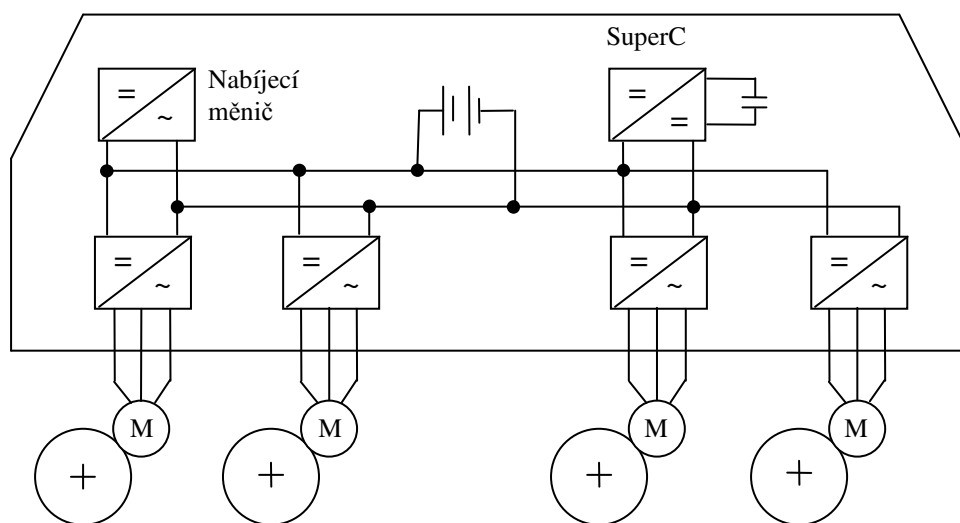
Obrázek 1: Akumulátorová posunovací lokomotiva řady E 407.001 [15]

1.2 Současné akumulátorové lokomotivy

1.2.1 Koncepce fotovoltaického napájení kolejového vozidla

Trendem dnešní doby je koncepce provozu s nepřímým stacionárním napájením. Tato koncepce předpokládá umístění fotovoltaických panelů především v koncových stanicích tratě. Energie se z panelů uchovává v tzv. staničních akumulátorech. Tyto staniční akumulátory při pobytu ve stanici dobíjí vozidlo. Určitou alternativou je pohon se smíšeným fotovoltaickým napájením. Opět se předpokládá dobíjení akumulátorů ve vozidle ve stanicích. Vozidlo má na střeše fotovoltaické panely a jimi vyrobená energie je využívána trakčním pohonem s menšími ztrátami. Tato koncepce je vhodná pro regionální dopravu.

Na realizaci projektu se specializuje Univerzita v Pardubicích (obr. 2). Navrhuje se čtyřnápravové akumulátorové vozidlo pro dopravu s obsaditelností 80-ti míst. Hmotnost v provozu je 62 t. V potaz se bere trakční charakteristika.



Obrázek 2: Koncepce elektrické výzbroje akumulátorové lokomotivy

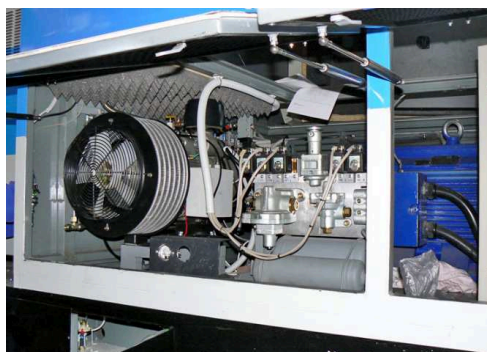
Elektrická výzbroj akumulátorového vozidla se skládá ze čtyř bezpřevodových pohonů se synchronními motory s permanentními magnety, které jsou napájeny ze čtyř střídačů. Napájení střídačů je ze stejnosměrné sběrnice o napětí 750V. Přes tuto sběrnici je připojen akumulátor. Superkapacitor je připojen přes měnič. Součástí sběrnice je také měnič, který slouží pro nabíjení vozového akumulátoru z akumulátorové stanice nebo ze sítě. [16]

1.2.2 Akumulátorová elektrická lokomotiva 710.201-5 - ARCELORMITTAL

Toto třínápravové hnací vozidlo vzniklo přestavbou a modernizací dieselhydraulické lokomotivy řady 710 (T334) z ČKD lokomotivka n. p. Praha. Původní je pouze rám a pojezd. Je vybavena elektromechanickým přenosem výkonu a zdrojem elektrického proudu je olověný trakční akumulátor o jmenovitém napětí 560V a kapacitě 775Ah. Podrobnější popis je na straně 47 a 48. [19]

Na samotném vývoji akumulátorové lokomotivy se podíleli několik let odborníci z Vysoké školy báňské -Technické univerzity Ostrava a z ostravských společností Arrow line a Inovační, sdružených v Technologickém centru Ostrava. Do výroby lokomotiv se také zapojily regionální společnosti Dodávky automatizace, Krnovské opravy a strojírna či Pneukom.

Akumulátorová lokomotiva disponuje ekologičtějším a čistějším provozem než stávající diesellové lokomotivy. Nevypouští žádné emise ani prach do ovzduší a výrazně přispívá k lepšímu životnímu prostředí v regionu. Je určena pro vlečky a logistické dopravní terminály. [18]



Obrázek 3: Motor A314 [19]



Obrázek 4: Rozvaděč s hlavním rozpojovačem [19]

1.2.3 Minibus s elektrickým pohonem ZEUS M 200 EVOLUTION

Zeus je elektrický minibus na baterie (obr. 5). Má nulové emise, spolehlivou a vyspělou technologii. Používá se tam, kde hraje důležitou roli dopad na životní prostředí (hluk, emise). Pohon zajišťuje elektrický motor na lithiové baterii, jejíž autonomie provozu přesahuje 120 km.

Základní parametry minibusu:

- maximální přípustná hmotnost 7 tun,
- maximální rychlost 45 km/h,
- maximální sjízdný sklon 16%,
- průměrná spotřeba při plném zatížení 0,44 kWh,
- motor je elektrický (střídavý proud, chlazený kapalinou),
- maximální výkon 60 kW při 4500 ot/min.,
- střídač typu IGBT (chlazený kapalinou),
- baterie (78 lithiových polymerových článků, 228 V, 200 Ah, celková kapacita je 57,6 kWh). [24]

1.2.4 ŠKODA 25 Tr IRISBUS

Tento nový vysokokapacitní nízkopodlažní trolejbus využívá výhod progresivní elektrovýzbroje (obr. 6). Motor je asynchronní trakční o jmenovitém výkonu 240 kW. Je vybaven převodovkou s konstantním převodovým poměrem a napájen z regulovaného střídače na bázi IGBT tranzistorů. Střídač zajišťuje také funkci elektromagnetické brzdy (brzdná energie je rekuperována zpět do troleje). Trakční akumulátorová baterie je umístěna na střeše trolejbusu. Baterie používá NiCd články typu STH600RC, počet použitých článků je 132, jmenovité napětí baterie odpovídá 158 V, jmenovitá kapacita 60 Ah. [25]



Obrázek 5: Minibus s elektrickým pohonem ZEUS [24]



Obrázek 6: ŠKODA 25 Tr IRISBUS [25]

1.2.5 Vlaky na principu magnetické levitace

První plány na výstavbu vysokorychlostních tratí začaly v 70. letech ve Francii, Japonsku a Německu. O pár let později vznikla nejmodernější koncepce vlaků. V Německu to byly Transrapidy a v Japonsku Maglevy. Tyto vlaky mají nejmodernější a nejrychlejší, ale zároveň nejdražší druh kolejové dopravy. Vlak se pohybuje na „polštáři“ magnetického pole, který tvoří soustava supravodivých magnetů. Ty jsou zabudovány v trati i ve vlaku. Pohybují se několik centimetrů nad zemí. [17]

a) Maglev

Vývoj se řadí ke konci 20. století. Zajímavost vlaku je v použití konstrukce magnetické dráhy. Pohon je vysokorychlostní, pohodlný a důležitou věcí je, že šetří životní prostředí. Přispěl také ke zlepšení dopravních situací. Pro tento pohon je známý anglický název MAGLEV (Magnetic Levitation). Maglev nemá kola, převody ani nadzemní trakční vedení. Místo kol a kolejnic jsou použity systémy bezkontaktní elektromagnetické levitace, vedení a pohonu [9]



Obrázek 7: Vlak MAGLEV ve stanici. [9]

b) Transrapid

Je to německý železniční systém, který je zkoušen od 70. let. Opět pracuje na podobném principu jako Maglev, čili na magnetické levitaci. Výhody levitace jsou, že nevznikají škodlivé zplodiny, hlučnost je na velice nízké úrovni, dráha nepotřebuje speciální údržbu, velká úspora energie. Ve skutečnosti vlak potřebuje ke vznášení méně energie, než spotřebuje klimatizace. Zvládá příkřejší svah, ostřejší zatáčky. Rychlost v běžném provozu je 431 km/h a rekord v roce 2003 byl 501 km/h. [31]



Obrázek 8: Transrapid v Německu. [31]

1.3 Nekonvenční lokomotivy na našich kolejích

1.3.1 Akumulátorová lokomotiva

Mnoho odborníků se zabývá principy skladování energie na celém světě. V praktických aplikacích jsou stále dominantní nikl-kadmiové (NiCd) nebo olověné (Pb) akumulátorové. Nevýhodou baterií je jejich velikost a váha. Na získání 1 kWh potřebujeme baterii zhruba o hmotnosti 40 kg. Z jednoho litru benzínu nebo nafty se může získat stejná energie jako z baterie o hmotnosti cca 120 kg a objemu téměř 60 litrů. Konvenční baterie se tudíž nehodí pro pohon automobilů, které by mohly konkurovat automobilům se spalovacím motorem. Jednoduše řečeno do automobilu se vejdu baterie nebo pouze cestující. Jiná situace nastává u lokomotiv. Železniční vozidla s malým jízdním odporem a krátkým denním během zejména na posunu nevyžadují energeticky vydatnou baterii. Umístění baterií řádově v tunách není problém v lokomotivě uskladnit. Lokomotiva tuto váhu využívá k adhezi (nedochází

k prokluzování hnacích kol). Číselné vyjádření nám řekne, že na 1 km posunu nám stačí zhruba 4 kWh baterie, což je cca 160 kg baterií. Na průměrný celodenní provoz o délce 50 km je to 8 tun baterií. Akumulátorová lokomotiva se snaží využívat všech výhod elektrických lokomotiv, máme na mysli tichý a čistý provoz a nezávislost motorových lokomotiv. Vše má také své nevýhody, jedná se o dojezd a celkovou dobu provozu, se kterou je spojena doba nabíjení. Tato kritéria nám určuje kapacita akumulátorů. Akumulátorové lokomotivy používáme tam, kde tato kritéria nevadí a akumulátorové lokomotivy zde hrají ideální roli s levným provozem. To platí zejména na posunu a na vlečkách. Význam akumulátorových lokomotiv spočívá v použitelnosti v místech, kde je zapotřebí dodržovat ekologii. Řeč je hlavně o továrnách blízko obytných zón aj. [5]

1.3.2 Hybridní lokomotiva

Hybridní lokomotiva vznikne spojením lokomotivy akumulátorové a motorové. Lokomotiva se může využívat jako čistě akumulátorová, motorová, která používá menší motor s plným výkonem v delším časovém úseku, nebo jako kombinace těchto dvou typů. Sloučením jejich výkonu se v omezeném časovém úseku zvětšuje výkon lokomotivy a tento výkon se dá využít v rozsahu kapacity baterie, podobně jako u akumulátorové lokomotivy při rekuperačním brzdění. Baterii je možno dobíjet i provozem spalovacího motoru. Toto dobíjení je dražší než z elektrické sítě. [5]

1.3.3 Nezávislá elektrická trakce

Vozidlo této trakce je nezávislé na přívodu elektrické energie, jelikož zdroj energie pro trakční motory je umístěn v samotném vozidle. Při použití elektrické energie pro pohon hnacích kol vzniká druh dopravy pod názvem elektrická vozba. Vozba je řízený pohyb drážního vozidla po železniční dráze. Rozdělujeme ji dále na vozbu závislou, polozávislou a nezávislou.

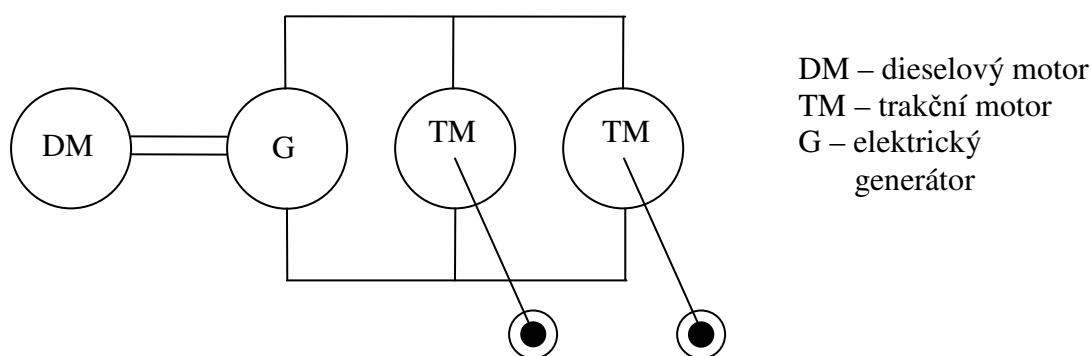
Podle zdroje energie rozeznáváme tyto druhy vozidel elektrické trakce:

- a) dieselelektrické,
- b) akumulátorové,
- c) setrvačnickové,
- d) benzínoelektrické,
- e) parní – turboelektrické.

a) Deselelektrická vozba

Deselelektrické lokomotivy mají v dnešní době instalované motory s výkonem 1471 kW. Spojením dvou nebo tří lokomotiv dosáhneme zvětšení výkonu, které mají tu samou pohonnou jednotku s mnohočlenným řazením. Tento druh vozby je používán hlavně ve státech, které jsou bohaté na ropu. V Sovětském svazu byl zaveden tento typ lokomotivy v roce 1931. V USA využívají tyto lokomotivy cca 65% železniční dopravy.

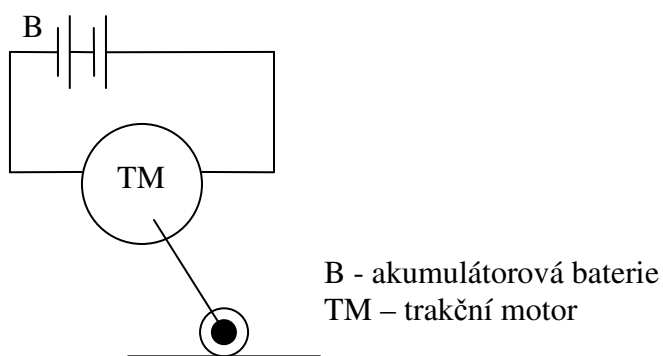
U nás mají použití hlavně na posunování vagónů, pro pohon vlaků na tratích bez trolejového vedení, na kolejištích ve velkých průmyslových závodech a pro přepravu osob na kratších vedlejších tratích. Představují zálohu pro hlavní elektrifikované tratě v případě havárií elektrických zařízení (trolejové vedení, napájecí stanice, aj.). [26]



Obrázek 9: Princip deselelektrické lokomotivy

b) Akumulátorová vozba

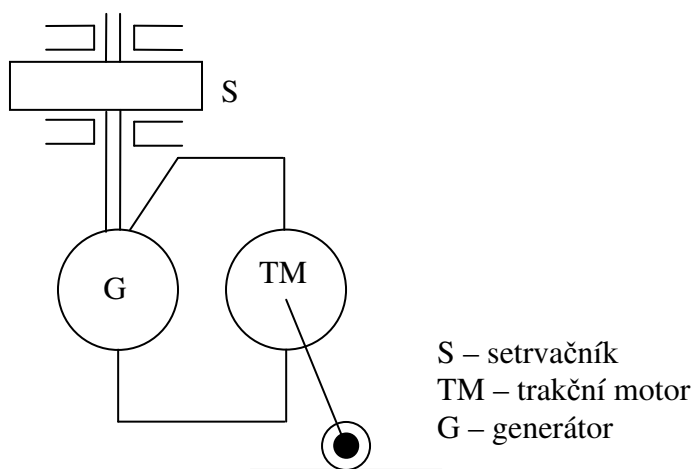
Akumulátorové vozby využívají ke svému pohonu trakčních motorů proud z akumulátorové baterie (obr. 10). Vozidla se vyznačují velkou hmotností a hlavní využití mají při menších vzdálenostech a menších rychlostech. Nejrozšířenější z nich jsou vozíky o nosnosti 1 - 3 tuny pro převoz zboží a materiálu ve skladištích, závodech, nádražích aj. Vozík má dojezd 20 - 40 km. Železnice využívají akumulátorové lokomotivy pro posuv vagónů a největší využití mají v dolech, kde je nebezpečí výbuchu. Pokusy se také provádějí na nákladních automobilech, které mají pohon na baterii. Dojezd nákladního automobilu na jedno nabití je do 120 km. [7]



Obrázek 10: Princip akumulátorové vozby

c) Setrvačnicková vozba

Setrvačnicková vozba (obr. 11) využívá nahromaděnou kinetickou energii ($E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$) v roztočeném setrvačnicku o velké hmotnosti. Setrvačnick se v napájecí stanici roztočí elektromotorem a po odpojení pohání setrvačností elektrický generátor. Setrvačnicková vozba se používá zejména v hlubinných dolech a v kyvadlové dopravě (mezi přístavem, mezi sklady, aj.). [7]



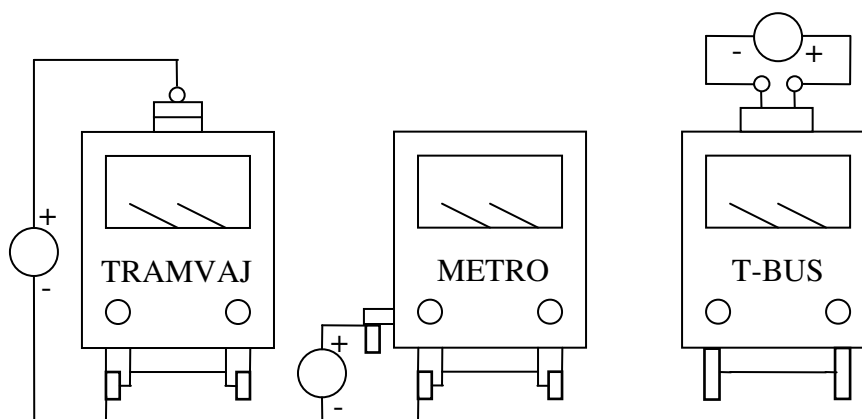
Obrázek 11: Princip setrvačnickové vozby

1.3.4 Závislá elektrická trakce

U závislé trakce se elektrická energie přivádí do vozidla z trakčního vedení vhodným sběračem. Vozidlo je proto závislé na rozvodu elektrického proudu.

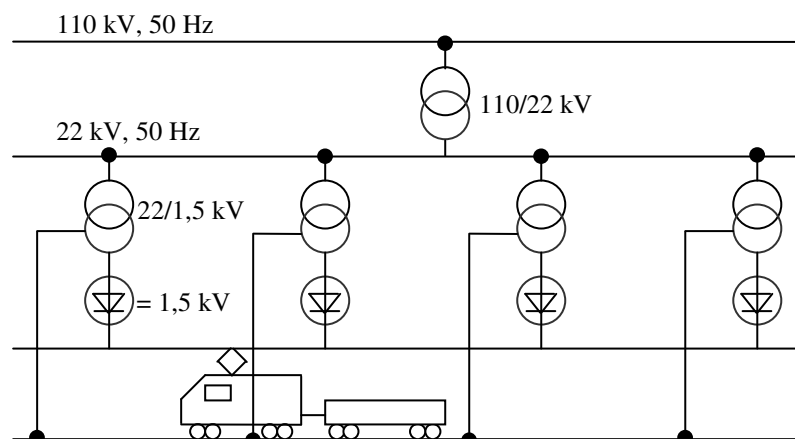
a) Vozidla pro stejnosměrnou soustavu

- Lokomotiva nebo tramvaj – odebírá elektrickou energii z trolejového vedení pantografovým sběračem (+ pól) a kolejnicí se proud vrací zpět ke zdroji (- pól).
- Metro – odebírá elektrickou energii z třetí kolejnice (+ pól), která je uložena izolovaně (po této kolejnici metro nejedí), a kolejnice, po kterých souprava jezdí, tvoří opačný pól (- pól).
- Trolejbus – odebírá elektrickou energii z dvoupólového trakčního vedení (jeden vodič + pól, druhý vodič - pól).



Obrázek 12: Princip napájení městské dopravy. [23]

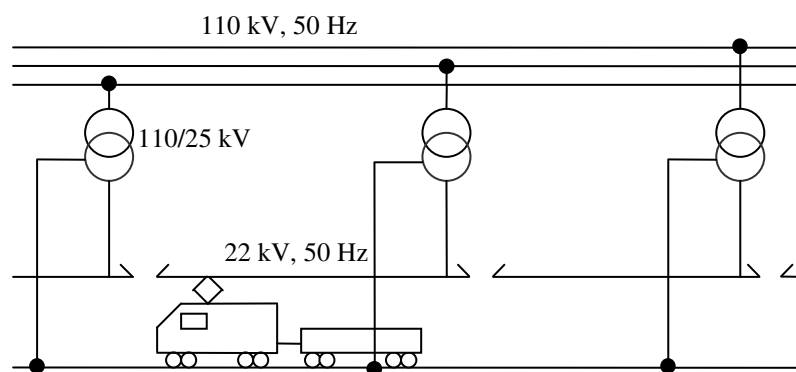
Stejnosiměrný proud se vyrábí v měnících. Měnírna je elektrická stanice, ve které se transformuje napětí z vyšší napětíové hladiny na nižší a střídavý proud se usměrňuje.



Obrázek 13: Schéma napájení hlavní dráhy stejnosměrným napětím 1,5 kV [23]

b) Vozidla pro jednofázovou a třífázovou soustavu:

Trolej jednofázové soustavy je napájena napětím 10 kV až 25 kV s frekvencí 50, 25 nebo 16⅔ Hz. V ČR se používá frekvence pouze 50 Hz. V Německu, USA, Švýcarsku a dalších zemích se používá frekvence nižší z důvodu komutace střídavého motoru. V lokomotivě se střídavý proud usměrní nebo se změní jednofázová soustava na trojfázovou. Lokomotivní transformátor je řešen jako autotransformátor. Přívod trojfázové soustavy je řešen kolejnicí a dvěma trolejemi. Napětí přívodu je 10 kV, 50 Hz. Trakční motory jsou kroužkové asynchronní. Tato trojfázová soustava je vhodná pro velmi dlouhé tratě. V ČR se vyrábějí dvouproudová vozidla. Tyto lokomotivy mohou jezdit na trati 3 kV stejnosměrného napětí, a také na trati 25 kV, 50 Hz střídavého napětí. Přepínání se provádí automaticky. [23]

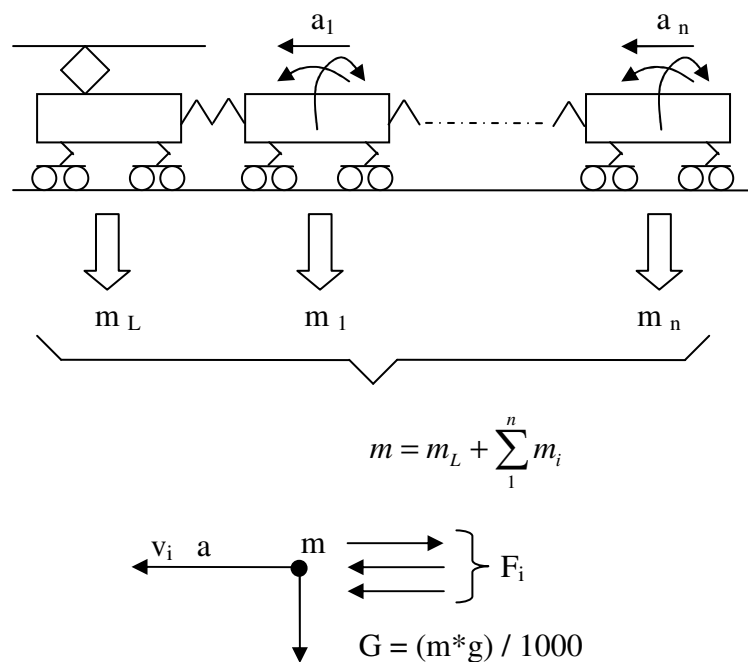


Obrázek 14: Schéma napájení hlavní dráhy 1f střídavé soustavy 25 kV, 50 Hz. [23]

1.4 Fyzikální popis

Na kolejové vozidlo nebo soupravy vozidel (vlaku) působí při jízdě na vozidla síly, které nám rozhodují o velikosti okamžité rychlosti nebo zrychlení (zpomalení) vozidel. Jedoucí vlak je složitá dynamická soustava, kde nepůsobí pouze samotný pohyb ve směru jízdy, ale dochází i k pohybům jednotlivých částí vozidla navzájem (např. kolébání a kmitání skříně vůči podvozku). Ve vlaku pak dochází ke vzájemnému pohybu vozidel vlivem vůle ve spřáhlech a činnosti pružin nárazníků. Těmito pohyby, které ovlivňují jak bezpečnost, tak i komfort jízdy, se zabývají konstruktéři. Pro dynamiku je zajímavý hlavně pohyb vozidla po směru jízdy. Pro snazší určení vlastností tohoto pohybu bereme v potaz následující dvě zjednodušení: [2]

1. vozidlo (vlak) se pohybuje přímočaře a má jen jeden stupeň volnosti,
2. vozidlo (vlak) je z hlediska hmotnosti na jednotku délky homogenní a délka je zanedbatelná vzhledem k ujeté dráze. Považujeme ho tedy za hmotný bod.

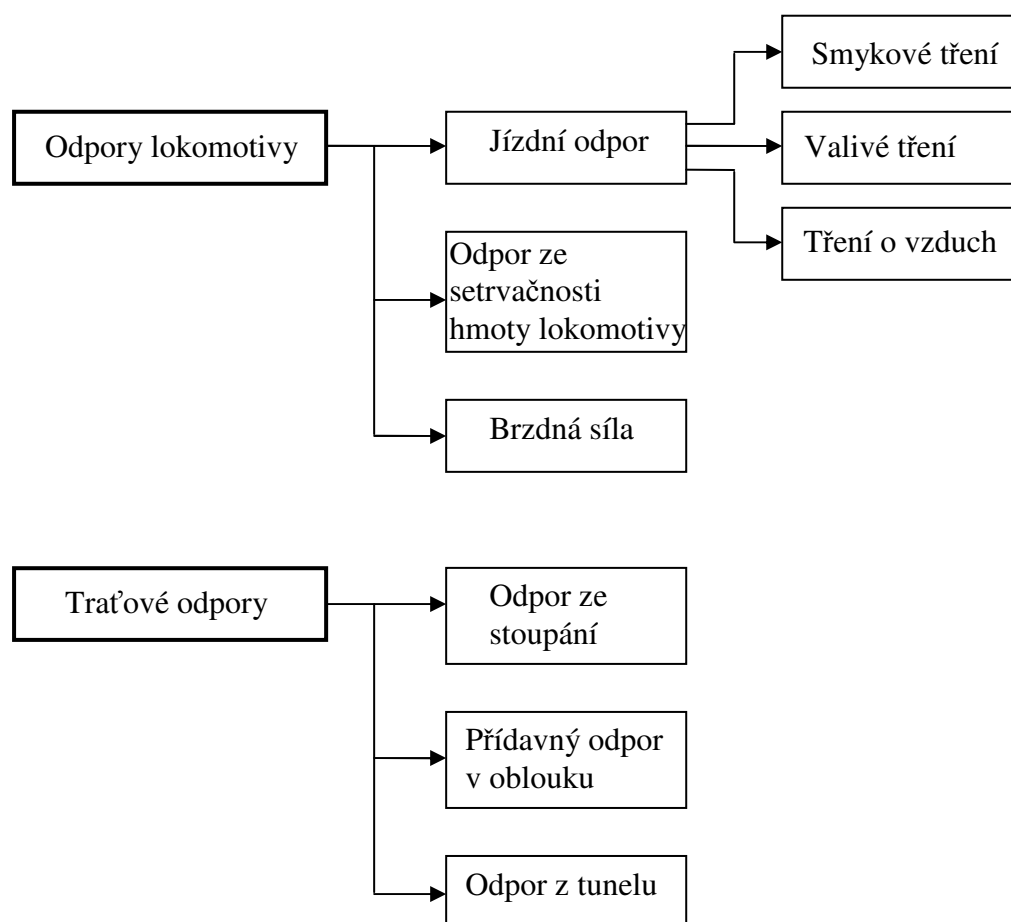


Obrázek 15: Zjednodušená představa vlaku jako hmotného bodu

Přesnost dosažení trakčních výpočtů je ovlivněna řadou obtížných, časově i místně proměnlivých faktorů, jako je teplota, vlhkost vzduchu, směr větru, nerovnosti kolejnic, znečištění, tlak aj. Pro tyto proměnné faktory jsou uvedena zjednodušení pro většinu případů přípustná a umožňují přiměřeně přesně sledovat pohybové jevy při jízdě. [2]

1.4.1 Trakční odpory

Jsou to všechny síly, které působí na vozidlo (vlak) při jízdě, kromě síly tažné. Podle místa jejich vzniku dělíme trakční odpory podle následujícího schématu:



Obrázek 16: Rozdělení podle místa výskytu

Mezi pasivní odpory patří jízdní odpor, odpor ze stoupání a přídavný odpor z oblouku. Odpor ze setrvačnosti hmoty se vyskytuje při změně rychlosti a může být kladný při zrychlení a záporný při zpomalování. Odpor brzdový vytváří brzdy. Odpor z tunelu se na tratích vyskytuje velmi zřídka, ale má podstatný vliv na jízdu vozidel podzemních drah. [2]

Hodnoty měrných trakčních odporů se stanoví

$$\rho = \frac{F}{G} = \frac{F}{9,81 \cdot M} \quad [-; N, kN; N, t], \quad [\text{I}]$$

kde G ... tíha vozidla (vlaku)

M ... hmotnost vozidla (vlaku).

A. Odpory lokomotivy

a) Jízdní odpor vzniká třením na vozidle a má tři složky:

$$F_0 = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad [N; km/h], \quad [\text{II}]$$

kde A ... složka smykového tření v ložiskách vozidla,

$B \cdot V$... složka valivého tření kola po kolejnicích při jízdě,

$C \cdot V^2$... složka tření o vzduch.

Měrný jízdní odpor:

$$\rho_0 = \frac{F_0}{G} = \frac{A}{G} + \frac{B}{G} \cdot V + \frac{C}{G} \cdot V^2 = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad [-; km/h] \quad [\text{III}]$$

1. Smykové tření v ložiskách lokomotivy:

Vzniká při otáčení čepu nápravy v dvojkolí ložiska. Velikost čepového tření je závislá na konstrukci, druhu a stupni zaběhnutí ložiska, na teplotě vzduchu, délce ujeté dráhy a dalších parametrech. [29]

Z rovnováhy momentů směrem ke středu kola vozidla vypočteme velikost síly, která je potřebná k překonání odporu z tření v ložisku jednoho kola: [2]

$$F_{A1} = A_1 = \frac{r}{r_{\text{kola}}} \cdot \varphi \cdot G_1 \quad [N; m, m, N / kN, kN], \quad [\text{IV}]$$

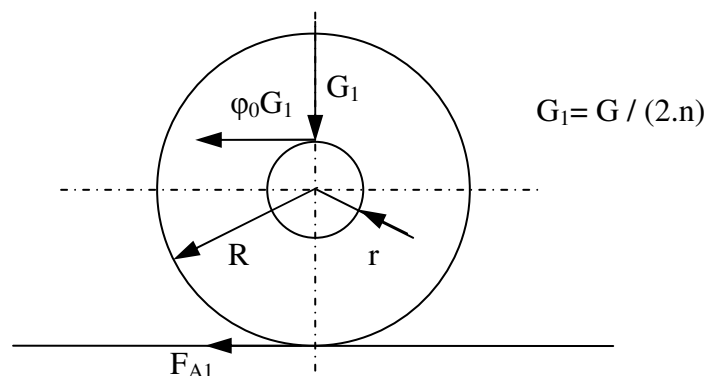
r ... poloměr čepu nápravy

r_{kola} ... poloměr kola

φ ... součinitel tření v ložiskách

n ... počet náprav vozidla

$G_1 = \frac{G}{2 \cdot n}$... část tíhy vozidla, připadající na 1 kolo



Obrázek 17: Složka jízdního odporu z tření v ložiskách

Pro celé vozidlo je odpor z tření v ložiskách:

$$F_{A1} = A = 2n \cdot A_1 = \frac{r}{r_{kola}} \cdot \varphi \cdot G_1 \cdot 2n = \frac{r}{r_{kola}} \cdot \varphi \cdot G \quad [N] \quad [V]$$

Měrný odpor tření v ložiskách

$$\rho_A = \frac{A}{G} = \frac{r}{r_{kola}} \cdot \varphi \quad [-; m, m, N / kN] \quad [VI]$$

2. Valivé tření kola po kolejnici

Vzniká při valení kola po kolejnici. Jedná se o odporovou sílu (tzv. odpor valivého tření), který brání ve valení tělesa, ale nesouvisí se smykovým třením ani s adhezním třením. V podstatě vzniká pružnou deformací materiálu kola a kolejnice v místě styku. Je nelineárně závislé na rychlosti. Závisí na materiálu kol a kolejnic, na technickém stavu trati aj. Síla na její překonání: [4], [29]

$$F_{ovt} = Z_k \cdot \xi = \xi \cdot G \cdot \cos(\alpha) = \xi \cdot m \cdot g \cdot \sqrt{1 - s^2} \quad [N; -, kg, m / s^2, -] \quad [VII]$$

Z_k	... zatížení kol na kolejnici
ξ	... koeficient valivého tření (při pohybu kola na kolejnici 0,001 – 0,002)
G	... tíha lokomotivy
m	... hmotnost
α	... úhel stoupání (je to úhel mezi rovinou vozovky a vodorovnou osou)
g	... tíhové zrychlení
s	... stoupání vozovky

3. Aerodynamický odpor (tření o vzduch)

Celková aerodynamická síla má obecnou velikost a směr. Pro posouzení vlivu na zatížení vozidla je třeba ji vhodně rozložit. Nejčastěji se rozkládají do směrů os souřadného systému vozidla. Zajímá nás velikost aerodynamických sil vzhledem k těžišti, a proto je nutné tyto síly přepočítat. Celkové aerodynamické účinky se mohou rozdělit do šesti složek. Tři složky jsou silové a tři složky momentové. Silové složky představují aerodynamický odpor a působí na ose x , v ose z působí aerodynamický vztlak a aerodynamická boční síla působí v ose y . Momentové složky aerodynamického odporu se dělí na stáčivý, klopný a klonivý moment. [6]

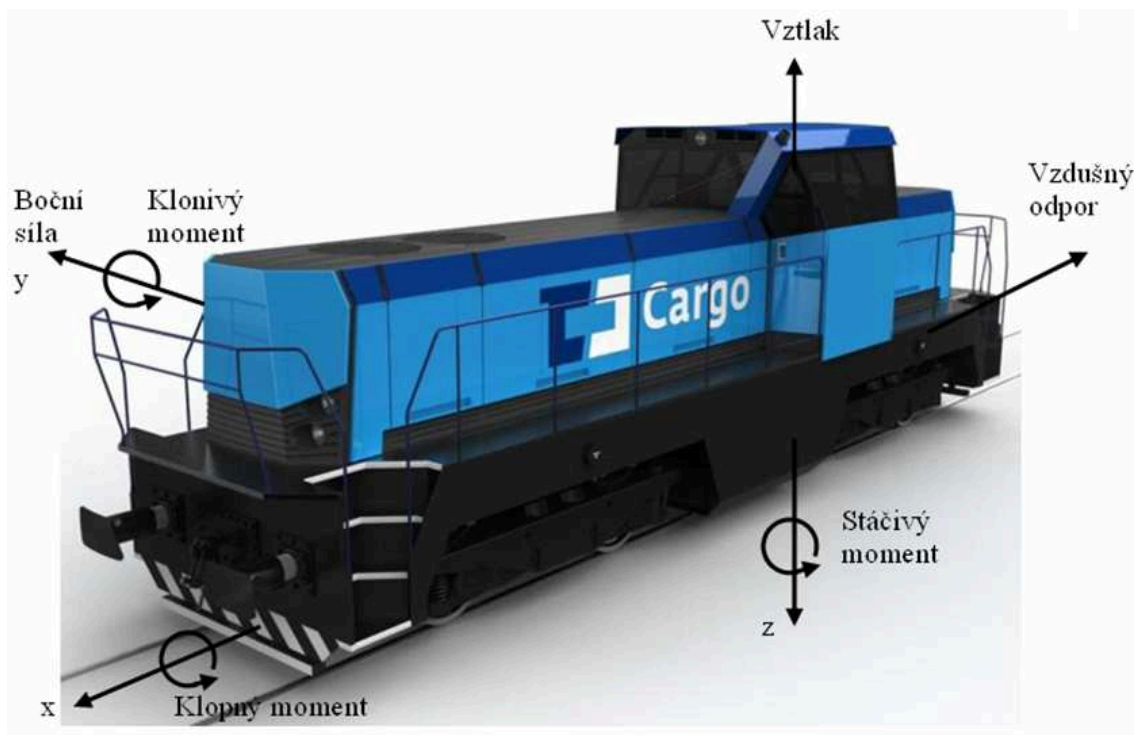
$$F_{oa} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho_{vz} \cdot S \cdot v^2 \quad [N; -, kg \cdot m^3, m^2, m / s^1] \quad [VIII]$$

C_x ... koeficient aerodynamického odporu

ρ_{vz} ... hustota vzduchu ($1,25 \text{ kg/m}^3$)

S ... čelní plocha

v ... rychlost (skládá se z náporové rychlosti v_n a protivětru v_0)



Obrázek 18: Souřadný systém pro aerodynamická měření sil a momentů. [6], [17]

b) Odpor ze setrvačnosti hmoty tělesa:

Setrvačnost je úměrná hmotnosti. Je to míra odolnosti proti změnám rychlosti. Všechny objekty se snaží odolávat změnám, pokud jsou v pohybu. Mají tedy setrvačnost. Některé objekty mají větší tendenci se bránit změnám, než jiné objekty. Je to spojeno s jejich hmotností. Hmotnost závisí ve velké míře na setrvačnosti objektu. Těžší objekt má větší sklon vzdorovat změnám, když se pohybuje. [32]

Těleso může konat pohyb posuvný či otáčivý. Při jízdě vlaku určitou rychlostí koná veškerá hmota postupný pohyb. Pohyb postupný a pohyb otáčivý je spojen hlavně s dvojkolím, s rotorem, s kotvou trakčních elektromotorů, generátorem, ozubenými dvojkolími. Z toho plyne, že vlak má větší energii než při pohybu postupném. Pokud se chce vlak rozjet nebo zastavit, potřebuje k tomuto úkonu větší práci. Jelikož nemůžeme měnit maximální tažnou sílu ani brzdnou sílu, projeví se nám to větší brzdnou drahou při brzdění nebo delší rozjezdovou drahou. Při výpočtech to respektuje součinitelem rotujících hmot, který bývá označován k , je to bezrozměrné číslo. Pokud se sečtou všechny složky rotační energie a vydělí se všemi složkami energie postupného pohybu, dostane se číslo menší než 1. Pokud se k němu přičte číslo 1, máme součinitel rotujících hmot k . [29]

$$k = 1 + \frac{\sum E_j}{\sum E_k}$$

Při trakčních výpočtech se zrychlení vypočte následovně:

$$a = \frac{F_{oz}}{k \cdot m} \quad [m/s^2; N, -, kg] \quad [IX]$$

Z tohoto zrychlení se spočítá odpor zrychlení:

$$F_{oz} = m \cdot a \cdot (1 + \rho_d) \quad [N; kg, m/s^2, -] \quad [X]$$

m ... hmotnost lokomotivy

a ... zrychlení lokomotivy

$k = 1 + \rho_d$... součinitel rotačních hmot

c) Brzdná síla

S hlediska energetiky jízdy vlaku a dynamiky slouží brzdná síla ke snížení rychlosti nebo zastavení vlaku. Dochází ke zpomalení, čili k vytváření umělého trakčního odporu (brzdné síly). Vlak při brzdění ztrácí pohybovou energii, a ta se většinou mění v neužitečné

teplo. Musí se brát v potaz i rekuperační brzdění, které se používá u akumulátorových lokomotiv, kde se část pohybové energie při brzdění mění na elektrickou, a ta se vrací zpět do trakčního vedení nebo do akumulátorové baterie. Malá část této pohybové energie se při brzdění využívá na překonání trakčních odporů. Dalo by se říci, že koná užitečnou trakční práci. [2]

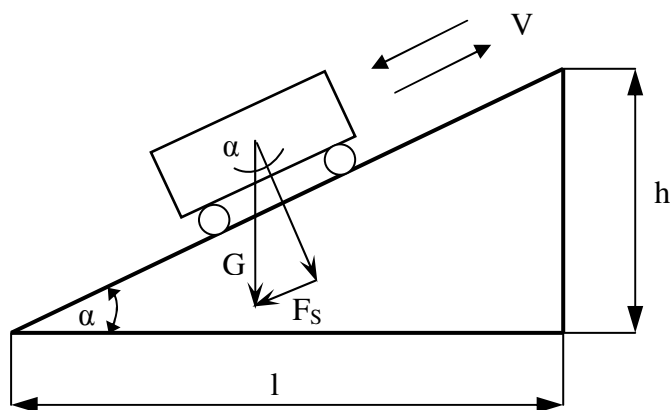
Brzdění nám slouží:

- k zajištění vlaku v klidu,
- k udržení konstantní rychlosti jízdy (přibrzdování),
- ke snížení rychlosti jízdy.

B. Traťové odpory

a) Odpor ze stoupání

Je to složka zemské tíže, která působí na vozidlo jedoucí na stoupání. Může být kladný (jízda do kopce) nebo záporný (jízda z kopce). Ve druhém případě vozidlo urychluje. [2]



Obrázek 19: Odpor ze stoupání

Odpor ze stoupání:

$$F_{os} = \pm G \cdot \sin \alpha \quad [N; N, 1], \quad G = 9,81 \cdot m \quad [N; t] \quad [XI]$$

G ... celková tíhová síla

α ... úhel stoupání (je to úhel mezi rovinou vozovky a vodorovnou osou)

Znamínko „+“ platí pro vozidlo, které jede do svahu a znaménko „-“ je pro vozidlo, které jede ze svahu

Pro velmi malé úhly můžeme uvažovat $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. Na adhezních kolejových tratích je $\tan \alpha < 0,1$, čili $\alpha < 5,7^\circ$, a toto zjednodušení lze použít pro stoupání, neboli sklon vozovky se vypočte:

$$s = \tan \alpha = \frac{h}{l \cdot 1000} \quad [1; m, km] \quad [\text{XII}]$$

h ... výška stoupání tratě

l ... délka tratě

$$\text{Poměr} \quad \frac{h [m]}{l [km]} = s \quad [\text{‰}], \quad \text{nazývá se stoupání tratě a uvádí se v promilích [\text{‰}]} \quad [\text{XIII}]$$

b) Přídavný odpor v oblouku:

Při pohybu lokomotivy po přímé trati nepřichází nákok do styku s hlavou kolejnice. Proto mají nápravy na přímé trati vlnovitý pohyb. V obloucích dochází v důsledku několika vlivů ke tření nákolku a plochy kola s hlavou kolejnice. Vzniká tzv. třecí síla a projevuje se jako trakční odpor (přídavný odpor v oblouku).

V porovnání s jinými trakčními odpory je tento měrný přídavný odpor z oblouku docela malý. [2]

c) Odpor z tunelu

Vzniká tehdy, když se zvětší aerodynamický odpor při průjezdu vlaku úzkým tunelem. Zvýšení aerodynamického odporu je:

- u jednokolejového tunelu cca 2 N/kN,
- u dvoukolejného tunelu cca 1 N/kN.

Na tratích ČD nemá až tak velký význam, daleko důležitější roli hraje v podzemních dráhách. [2]

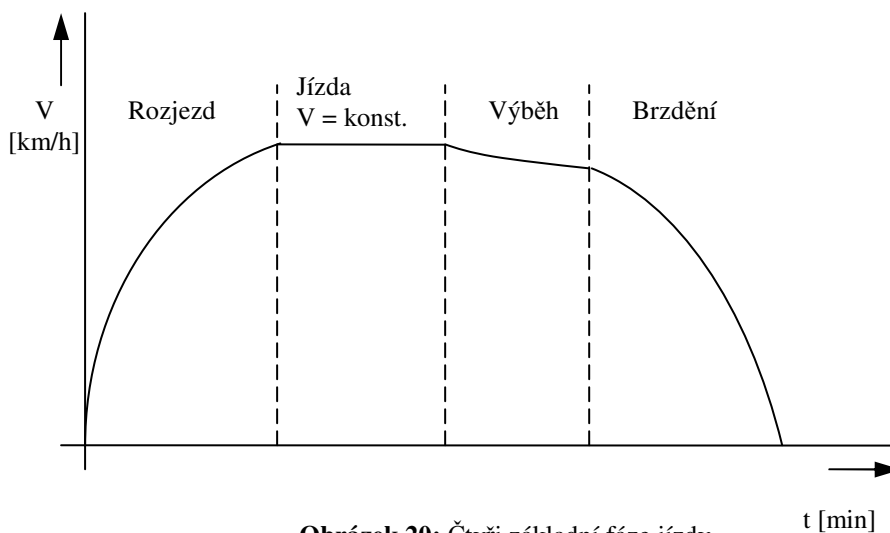
1.4.2 Tažná síla

Při jízdě vlaku jsou trakční odpory překonávány tažnou silou. Tuto sílu vyvíjejí hnací nápravy, které jsou poháněny trakčními motory.

Platí rovnice:
$$F_t = F_o + F_{os} + F_{or} + F_{oz} + F_{ob} \quad [N] \quad [XIV]$$

kde F_t ... tažná síla na obvodě hnacích kol,
 F_o ... jízdní odpor vlaku,
 F_{os} ... odpor ze stoupání,
 F_{or} ... přídatný odpor z oblouku,
 F_{oz} ... odpor ze setrvačnosti hmoty,
 F_{ob} ... brzdový odpor.

Při jízdě vlaku se všechny síly v rovnici nevyskytují najednou. Např. při brzdění $F_t = 0$ nebo při konstantní rychlosti $F_{oz} = 0$ aj. Tyto síly závisí na *fázi jízdy vlaku*. Jízdu vlaku rozdělujeme do čtyř fází (obr. 20): Rozjezd, jízdu konstantní rychlostí, výběh, brzdění. [2]



Obrázek 20: Čtyři základní fáze jízdy

1.4.3 Charakteristiky lokomotiv

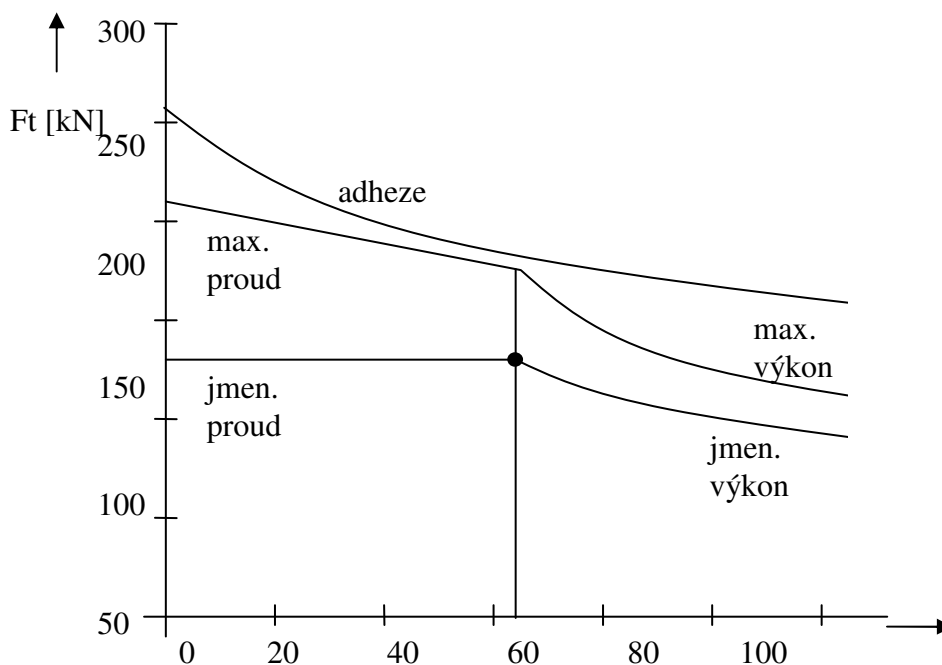
Jedná se hlavně o trakční charakteristiku a zátěžový diagram, které jsou podrobněji popsány níže. Udávají hlavní provozní vlastnosti lokomotiv.

a) Trakční charakteristika

Je to závislost tažné síly na obvodu kol na rychlosti. Udává se pro jmenovité napětí v troleji, středně ojetá kola a další podmínky. Do tohoto diagramu se také zahrnuje závislost maximální adhezní tažné síly, závislosti jízdního odporu vozidla na rovině nebo závislost všech odporů na stoupání, tažná síla na háku aj. [3]

- Stupňové řízení – hl. parametrem je jízdní stupeň (odporový, hospodárný, aj.).
- Plynulé řízení – uvádí se zde jak parametry ve jmenovitém pracovním bodě, tak čáry pro jmenovitý proud motorů (oddělují se režimy dlouhodobé a krátkodobé).

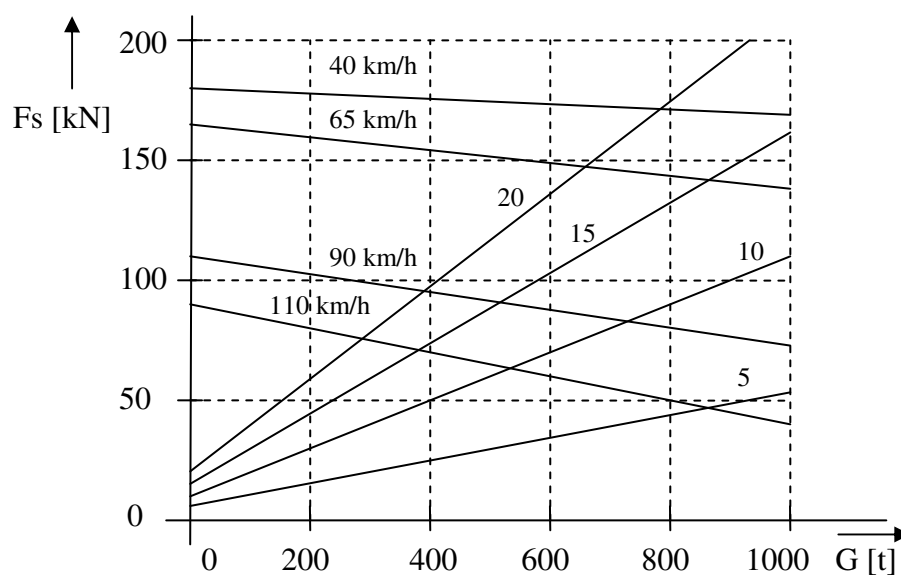
Příklad trakční charakteristiky je vidět na obr. 21. Lokomotiva má 82 tun. Je vidět omezení adheze, dále jmenovitá rychlost (65 km/h) a maximální rychlost (130 km/h), jmenovitá tažná síla (129,6 kN) a maximální tažná síla (253 kN). [3]



Obrázek 21: Trakční charakteristiky a omezení adheze pro lokomotivu

b) Zátěžový diagram

Tento diagram je na obr. 22. Ukazuje nám, jakou zátěž a do jakého stoupání můžeme zvolenou rychlostí táhnout vlak. Když vezmeme v potaz, že pro 10% stoupání je urychlení zhruba $0,1 \text{ m/s}^2$, můžeme graf použít a rozšířit dále. Například vlak o hmotnosti 850 tun může jet rychlostí při stoupání 5% asi 110 km/h, při stoupání 10% asi 85 km/h a 65 km/h při stoupání 15%. [3]



Obrázek 22: Zátěžový diagram

2. Praktická část

Hlavním úkolem v této části bylo vytvoření simulačního modelu spotřeby energie akumulátorové lokomotivy v programu MATLAB SIMULINK, kde jsou zahrnuty skutečné drážní profily. Následně byla navržena metodika optimalizace spotřeby energie.

2.1 Matlab

MATLAB

MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB je nástroj jak pro pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací. [30]

Simulink

Simulink je nadstavba MATLABu pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic. [30]

MATLAB se Simulinkem nacházejí své uživatele tam, kde je třeba rychle a úspěšně analyzovat, navrhovat, modelovat, simulovat a testovat, ale hlavně implementovat dosažené výsledky v minimálním čase do praktických podmínek reálného světa - ať již ve formě prototypů nových zařízení nebo ve formě řídicích programů, inovací a optimalizací ve výrobě či ve formě vyřešení složitého teoretického problému. Obsahuje plnohodnotný programovací jazyk čtvrté generace. Matlab má celou řadu aplikačních knihoven, které se nazývají „toolboxy“ (Rozšiřují možnosti jádra. Jsou orientovány na vědní a technické obory). [8], [30]

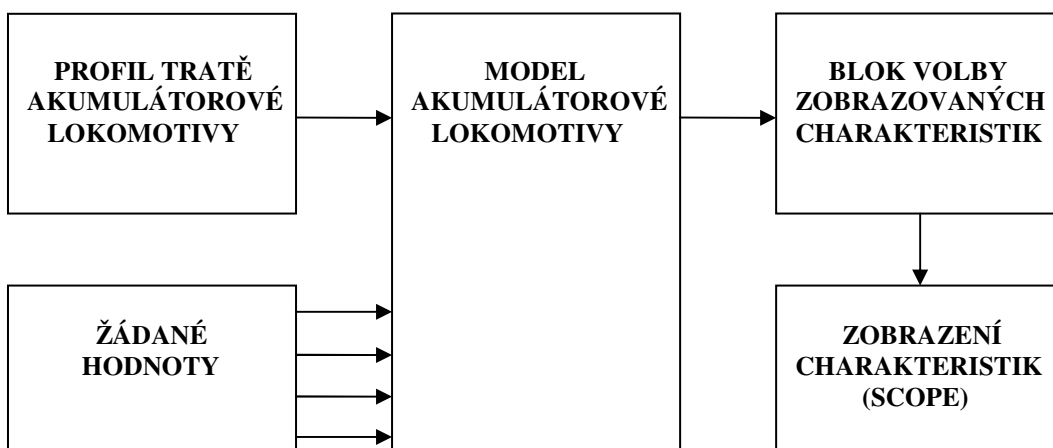
2.2 Model spotřeby energie akumulátorové lokomotivy



Obrázek 23: Použité akumulátorové lokomotivy

Tento model nám popisuje chování lokomotivy z hlediska kinematiky a dynamiky. Popisuje vstupní a výstupní hodnoty jednotlivých bloků. Skládá se ze tří hlavních bloků, které mají své podbloky, a bloku scope, který zobrazuje charakteristiky:

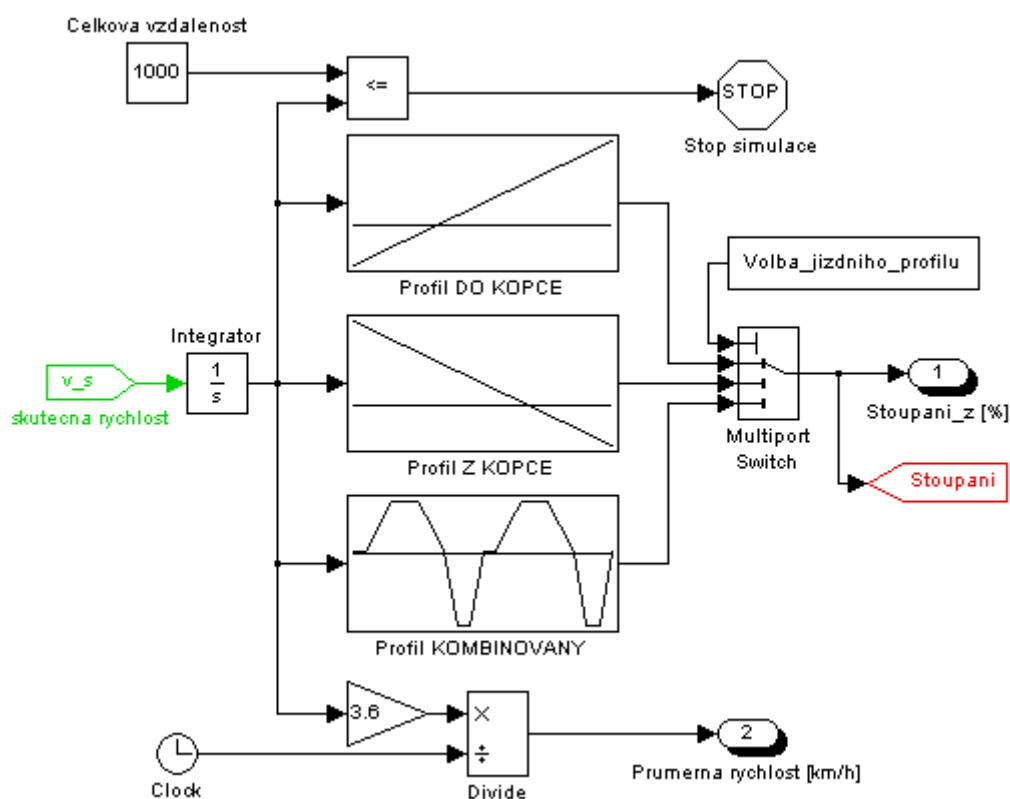
- profil tratě akumulátorové lokomotivy,
- model akumulátorové lokomotivy,
- blok volby zobrazovaných charakteristik,
- zobrazení charakteristik (Scope).



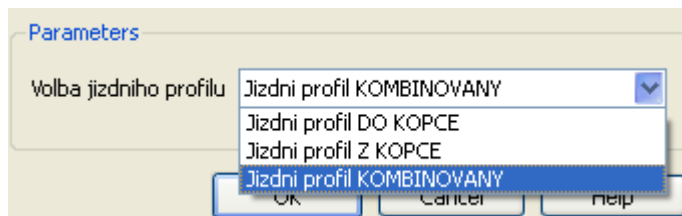
Obrázek 24: Blokové schéma simulační úlohy akumulátorové lokomotivy

2.2.1 Profil tratě akumulátorové lokomotivy

První blok reprezentuje profil tratě, jehož výstupem je stoupání tratě a průměrná rychlost lokomotivy. Vnitřní struktura tohoto bloku je na obr. 25. Jelikož se pro jízdní profil potřebuje dráha, musí se integrovat skutečná rychlost (realizuje se voláním proměnné přes blok Goto a From). Přes zvolený profil se dostane žádané stoupání tratě. Simulace se zastaví, jakmile dosáhne požadované dráhy nebo pokud je celková vzdálenost menší než zadaná vzdálenost. Na obr. 26 je vidět panel pro volbu jízdního profilu.



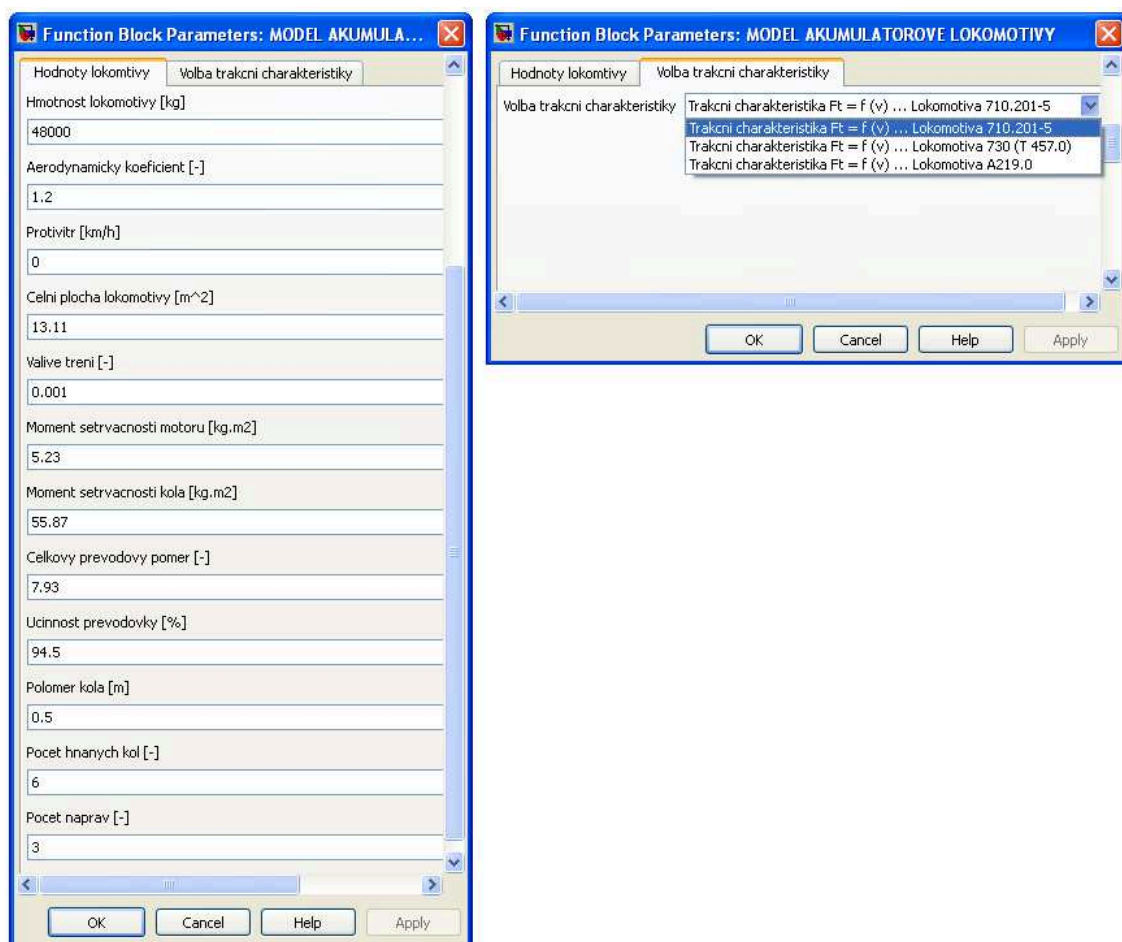
Obrázek 25: Vnitřní struktura bloku profilu tratě



Obrázek 26: Panel pro výběr jízdního profilu

2.2.2 Model akumulátorové lokomotivy

Druhý blok je samotný MODEL AKUMULÁTOROVÉ LOKOMOTIVY, do které vstupuje výše zmíněný profil tratě, požadované zrychlení a maximální zrychlení. V tomto bloku se vypočítají hodnoty žádané a hodnoty skutečné, které potřebujeme zjistit (např.: energie, výkon, dráha, rychlost, zrychlení, aj.). Tento blok má dvě záložky, kde první je na zadávání hodnot akumulátorové lokomotivy a druhá je pro zvolení trakční charakteristiky, která je předem nadefinovaná (obr. 27). Toto okno se otevře při dvojím kliku levým tlačítkem myši.



Obrázek 27: Panel pro zadávání konstant a výběr trakční charakteristiky

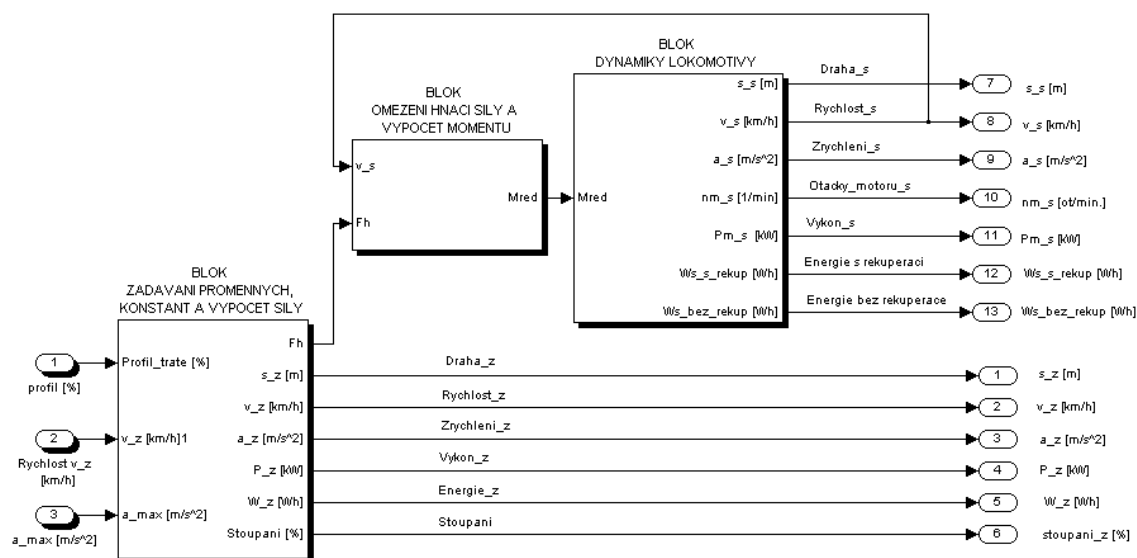
Vnitřní struktura

Tato simulační struktura se otevře kliknutím pravým tlačítkem myši na hlavní blok (Model akumulátorové lokomotivy), vybere se položka „look under mask“ (podívat se pod masku). Do této struktury vstupují tři proměnné (profil tratě, rychlost a maximální zrychlení) a konstanty, které jsou nadefinované. Vystupují z něj skutečné hodnoty a hodnoty žádané, které nám dále slouží k porovnání hodnot.

Vnitřní struktura je složena ze tří podbloků (obr. 28):

- blok zadávání proměnných, konstant a výpočet síly,
- blok omezení hnací síly a výpočet momentu,
- blok dynamiky lokomotivy.

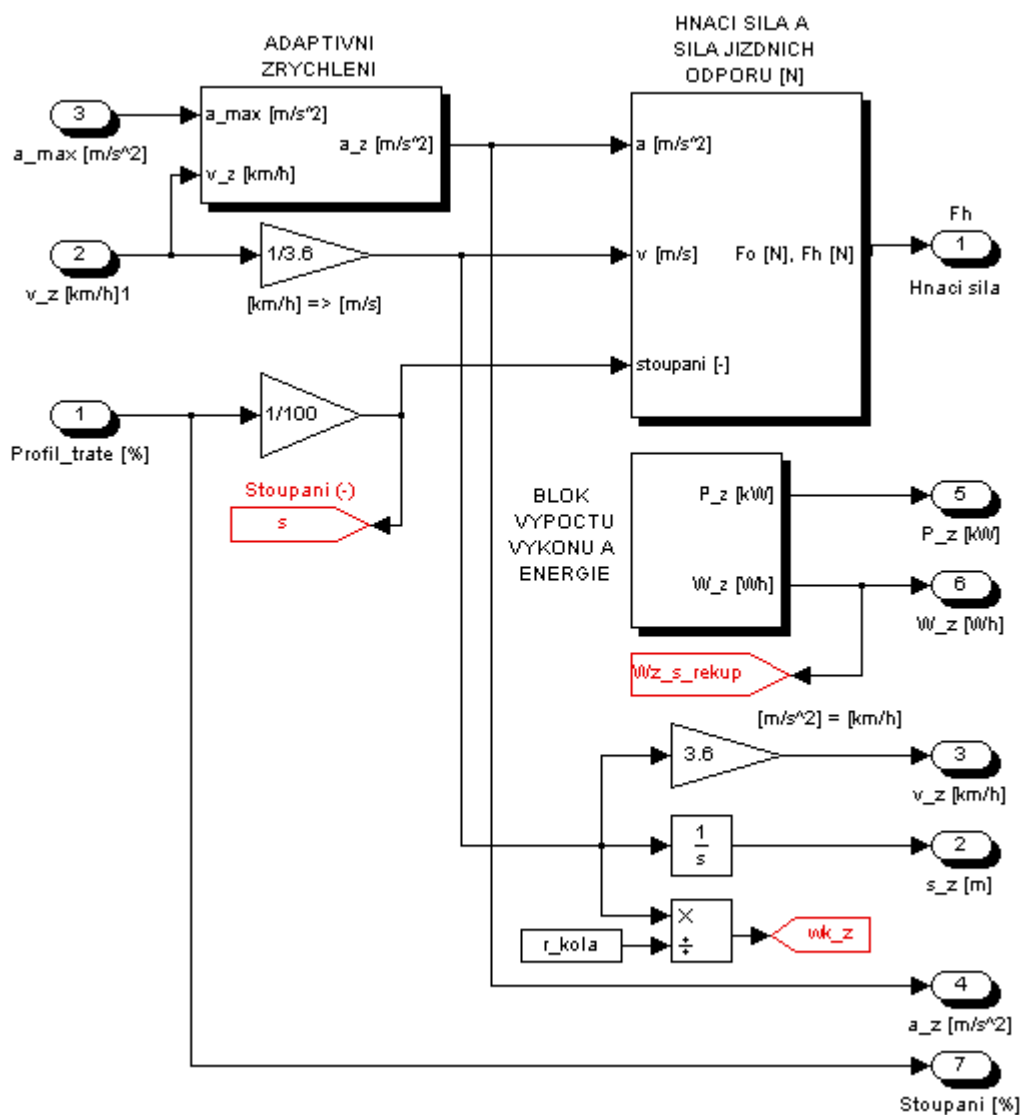
Tyto podbloky jsou dále popsány podrobněji. Výstupem, jak už bylo zmíněno, jsou hodnoty, které jsou pro tuto práci důležité.



Obrázek 28: Vnitřní struktura modelu akumulátorové lokomotivy

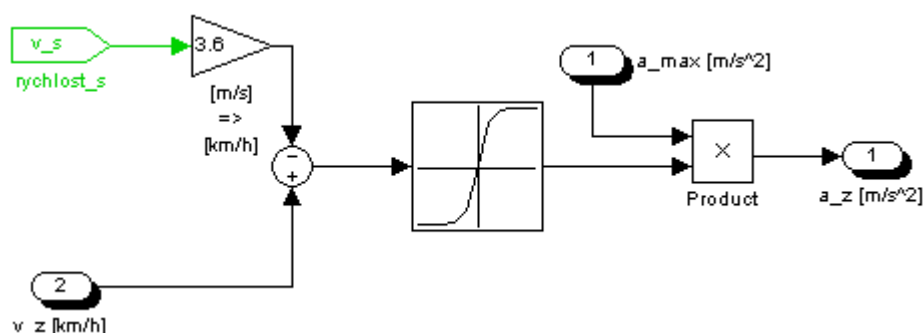
A. Blok zadávání proměnných, konstant a výpočet síly

Do bloku nám vstupuje maximální zrychlení, rychlost a profil tratě. Výstupem je hnací síla kola, žádaný výkon, žádaná energie, žádaná rychlost, žádaná dráha, žádané zrychlení a stoupání tratě (obr. 29). Tato hnací síla F_h je vstupní hodnotou do bloku, omezující hnací sílu podle trakční charakteristiky dané lokomotivy. Součástí vnitřního schématu je přepočet rychlosti z m/s^2 na km/h , integrací rychlosti dostaneme žádanou dráhu a jedna z důležitých věcí je žádaná úhlová rychlost kola, která se spočítá jako $v_z * r_{\text{kola}}$ (žádaná rychlost * poloměr kola).



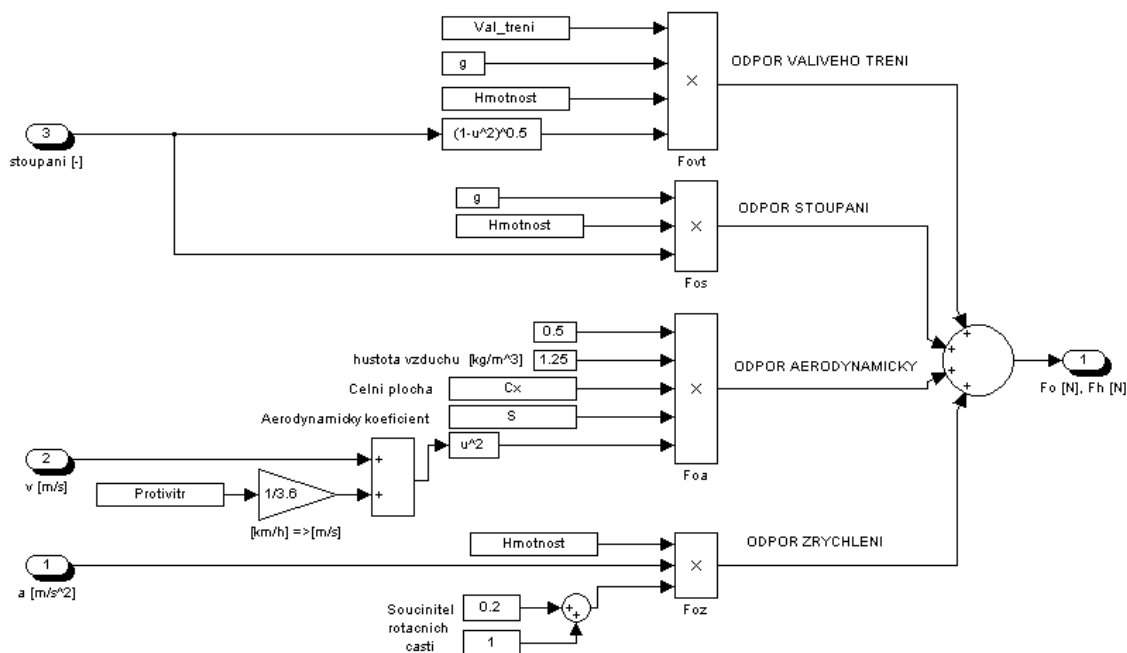
Obrázek 29: Vnitřní struktura a výpočet hnací síly

Do bloku *adaptivního zrychlení* vstupuje zrychlení a rychlost (obr. 29). Vnitřní struktura je na obr. 30. V bloku se porovnává skutečná rychlost s rychlostí žádanou. Vznikne odchylka, která je vynásobena hodnotou maximálního zrychlení.



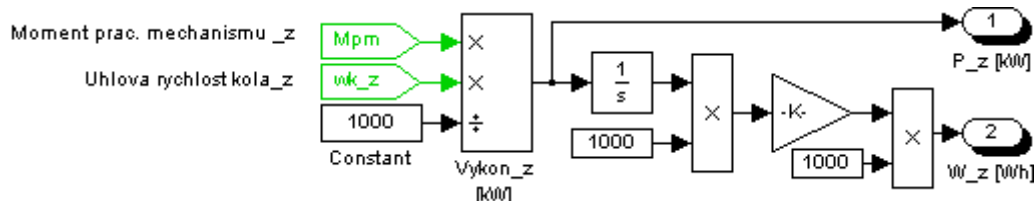
Obrázek 30: Vnitřní struktur adaptivního zrychlení

Vypočtené adaptivní zrychlení spolu s žádanou rychlostí a se stoupáním vstupuje do bloku *Hnací síla a síla jízdních odporů* (obr. 31), kde se realizuje výpočet odporu valivého tření, odporu stoupání, aerodynamického odporu a odporu zrychlení. Výstupem je odporová síla F_o a hnací síla F_h , která je vstupem do dalšího bloku.



Obrázek 31: Vnitřní struktura výpočtu hnací a odporové síly

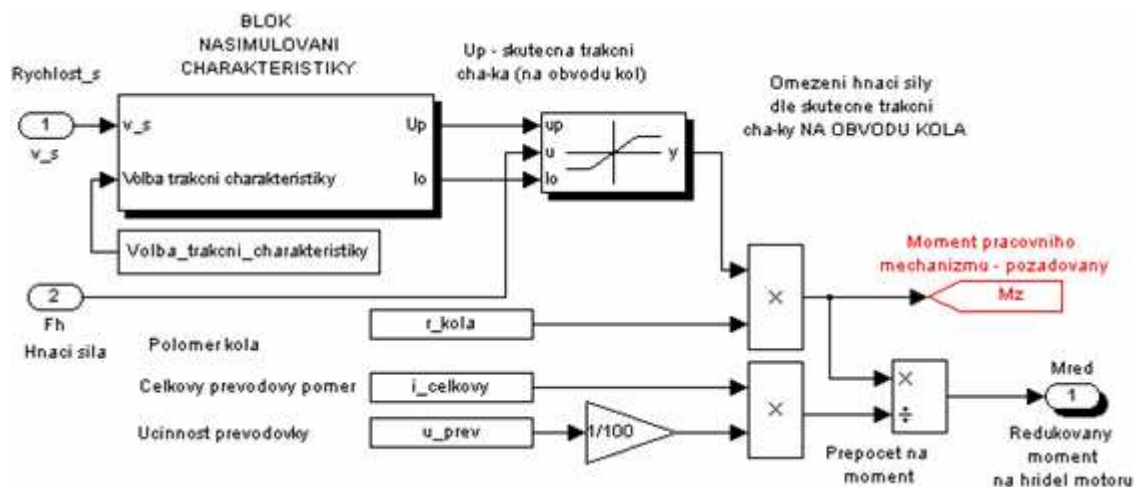
V bloku výpočtu výkonu a energie je odkaz žádaného momentu pracovního mechanismu (použit odkazový parametr FROM) a odkaz žádané úhlové rychlosti kola (také parametr FROM) vynásoben a následovně vydělen tisícem. Dostaneme hodnotu žádaného výkonu P_z v jednotkách kW. Žádanou energii dostaneme, když integrujeme výkon (obr 32).



Obrázek 32: Vnitřní struktura výpočtu výkonu a energie.

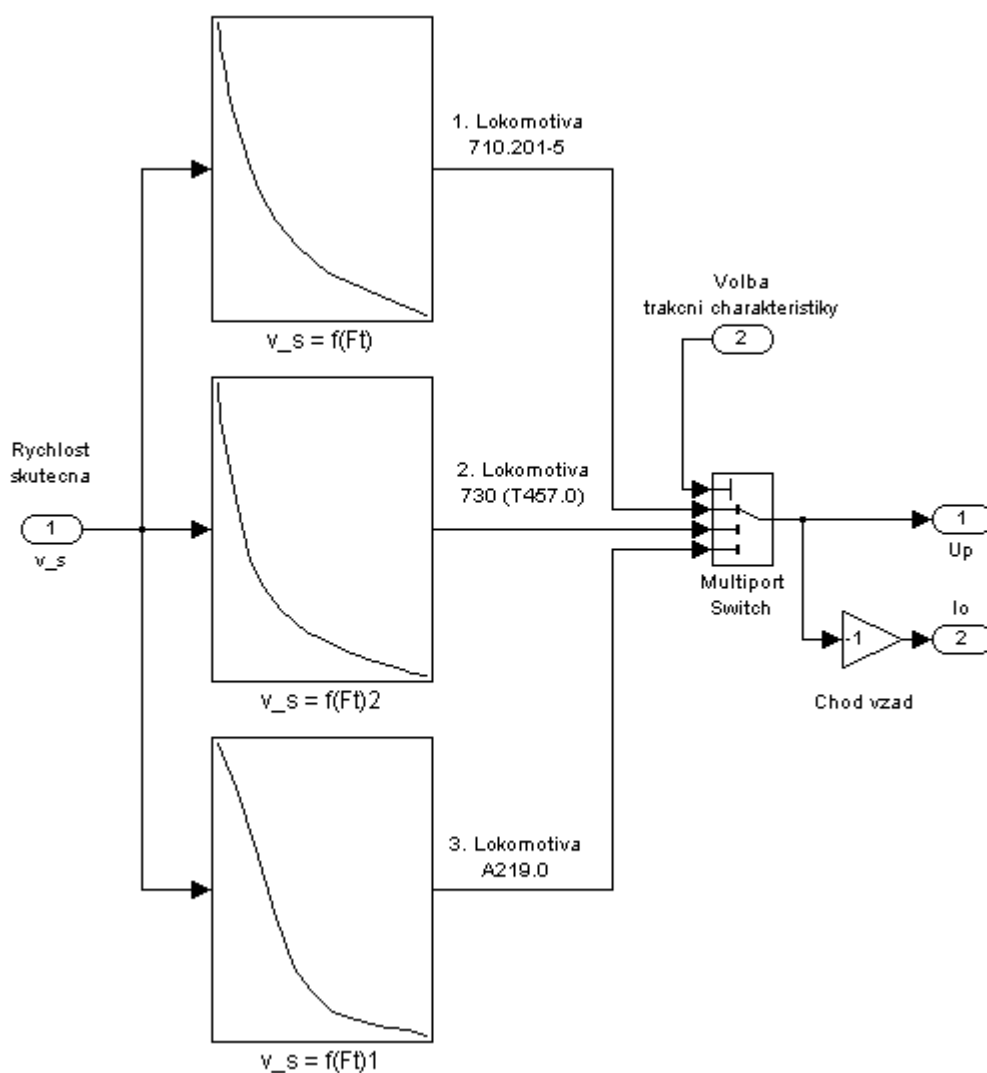
B. Blok omezení hnací síly a výpočet momentu

Tento blok podle skutečné trakční charakteristiky (závislost tažné síly na rychlosti) omezuje tažnou sílu dané lokomotivy. Do bloku s názvem *Blok nasimulování charakteristiky* vstupuje skutečná rychlost a volba trakční charakteristiky (musí se zvolit správná trakční charakteristika odpovídající lokomotivy). Výstupem bloku je zvolená charakteristika, která jde do bloku omezení. Z bloku vychází omezená hnací síla. Omezená hnací síla se vynásobí poloměrem kola a poskytne informaci o omezeném momentu. Jedná se o moment pracovního mechanismu, který se podělí součinem celkového převodového poměru a účinností převodovky. Výstupem je *redukovaný moment na hřídel motoru* M_{red} .

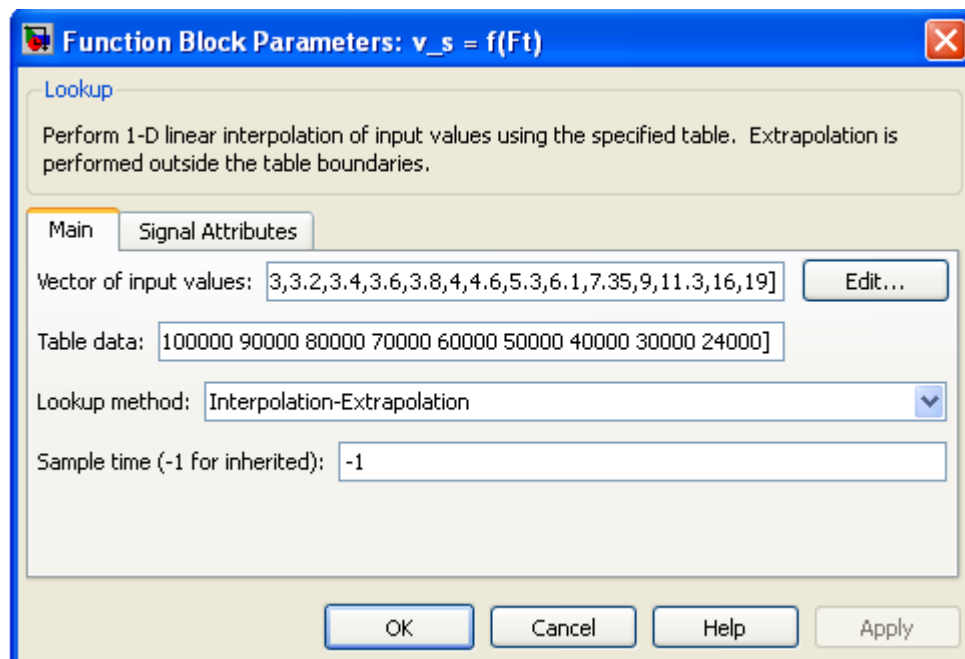


Obrázek 33: Vnitřní struktura bloku omezující moment

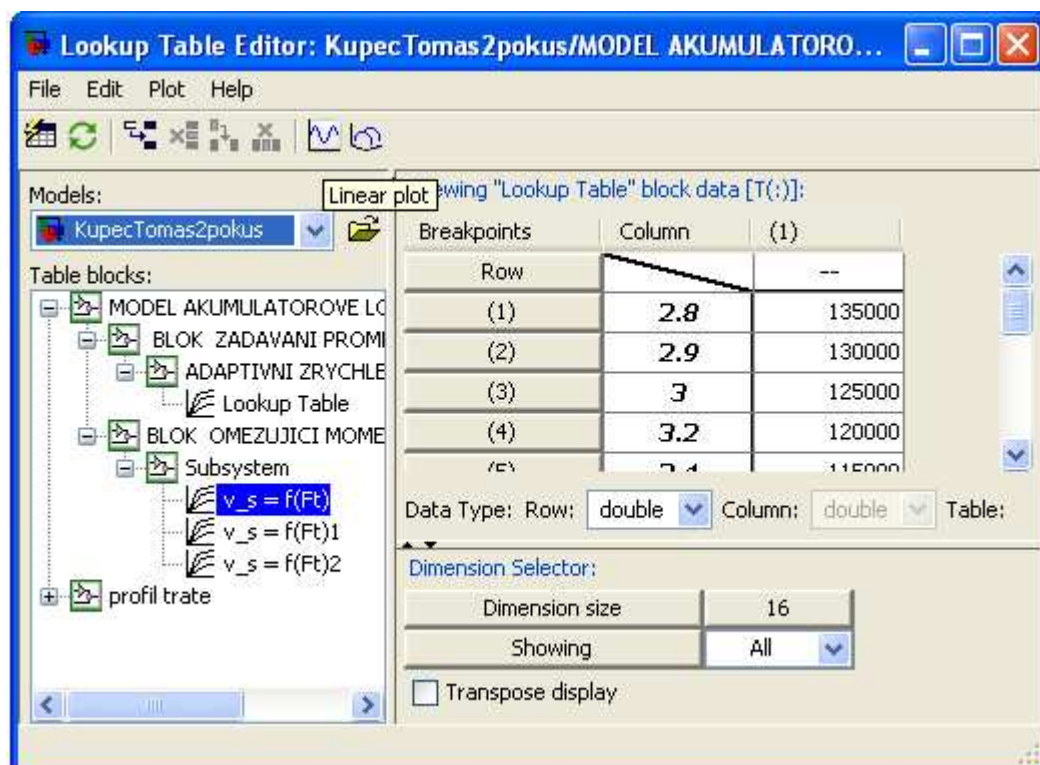
Nesmí se zapomenout, že každá lokomotiva má nejen své vlastnosti, které se zadávají do panelu pro zadávání konstantních hodnot (obr. 27), ale také svou trakční charakteristiku, která se musí nadefinovat v bloku nasimulování charakteristiky. Na obr. 34 je vidět, že jsou nasimulované 3 trakční charakteristiky pro 3 lokomotivy. Trakční charakteristiky se dají upravit dvojklikem na charakteristiku. Zobrazí se okno, které je na obr. 35. V tomto okně slouží pro zadávání x osy první řádek nazvaný „*Vector of input values*“ a do druhého řádku nazvaného „*Table data*“ se vkládá y osa charakteristiky. Nasimulování charakteristiky potvrdíme tlačítkem „*Edit*“ a „*OK*“. Charakteristika se může také doladit. Pomocí tlačítka Edit se uživatel přepne do tabulkového editoru „*Table Editor*“ (obr. 36), kde při kliknutí na obrázek sinusovky „*Linear plot*“ vyvolá průběh trakční charakteristiky, který může upravovat.



Obrázek 34: Dílčí simulace sloužící k nasimulování, přepínání trakčních charakteristik



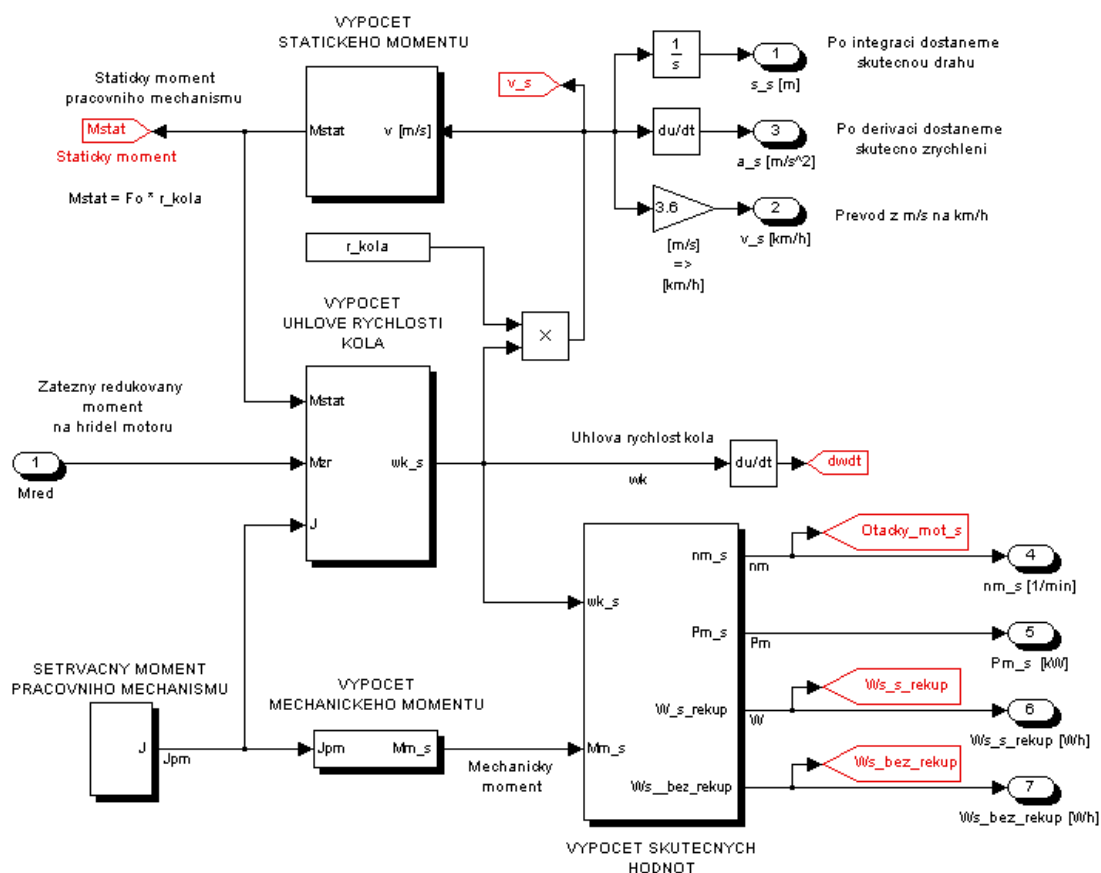
Obrázek 35: Okno zadávání hodnot trakční charakteristiky.



Obrázek 36: Zobrazení nadefinovaných hodnot, úprava hodnot

C. Blok dynamiky lokomotivy

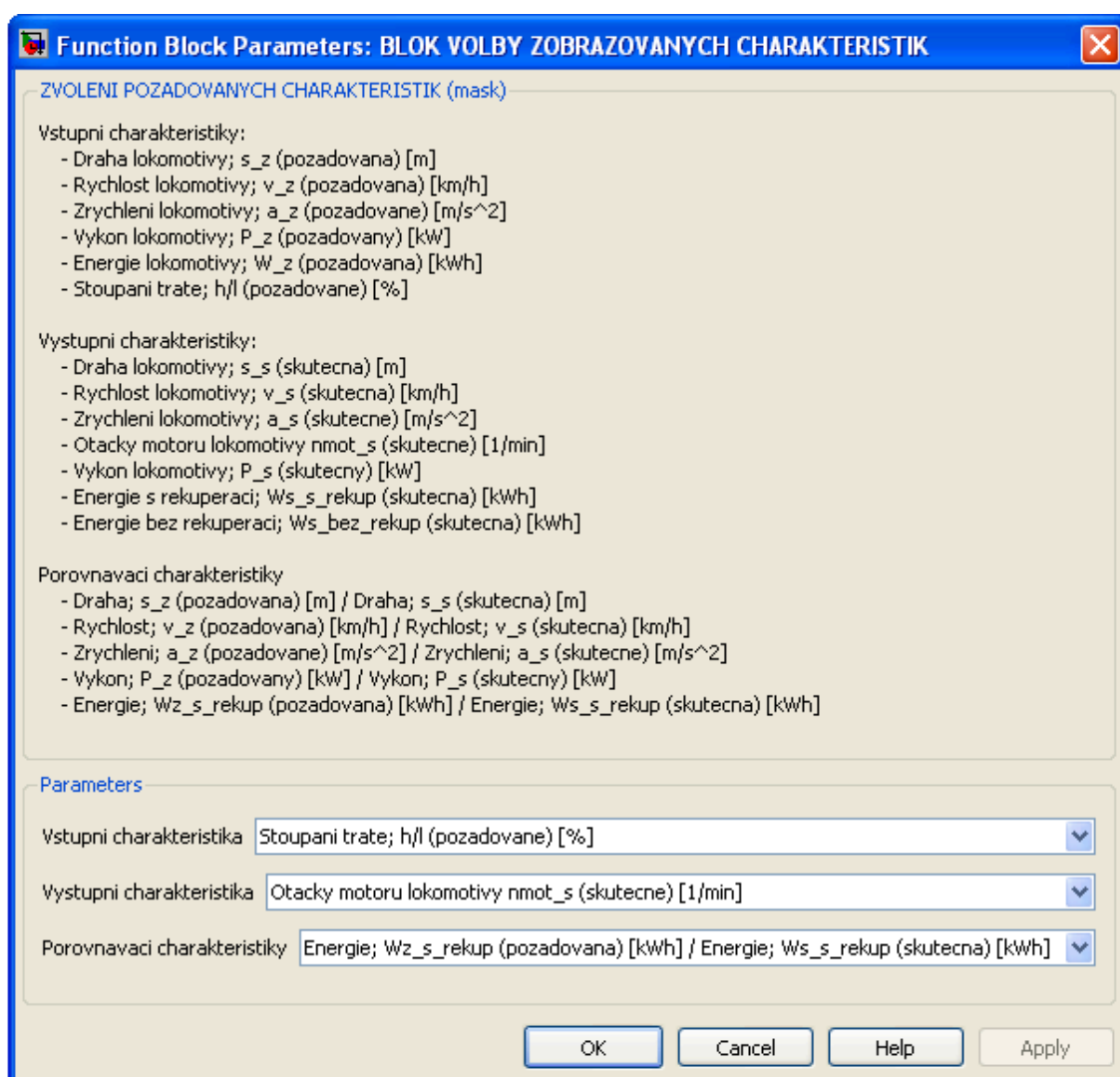
Tento blok představuje pohybovou úlohu. Vychází se z poloměru kola r_{kola} , který se vynásobí úhlovou rychlostí kola wk_s , získá se skutečná rychlost lokomotivy. Tato rychlost jde do bloku *výpočet statického momentu*. Zde je nasimulován odpor válivého tření, odpor aerodynamický a odpor stoupání. Po vynásobení hnací síly F_h a poloměru kola r_{kola} se dostane statický moment pracovního mechanismu M_{stat} . Tento statický moment spolu s redukovaným momentem a setrvačným momentem pracovního mechanismu vstupuje do dalšího bloku, ve kterém se určí skutečná úhlová rychlost kola. Tato úhlová rychlost jde s mechanickým momentem, který se spočítá v bloku *výpočet mechanického momentu* do posledního bloku, ve kterém se určí skutečné otáčky motoru, skutečný výkon a skutečná energie s rekuperací a bez rekuperace. Nesmí se také opomenout, že při integraci skutečné rychlosti dostaneme skutečnou dráhu, při derivaci této rychlosti skutečné zrychlení.



Obrázek 37: Vnitřní struktura bloku dynamiky akumulátorové lokomotivy

2.2.3 Blok volby zobrazovaných charakteristik

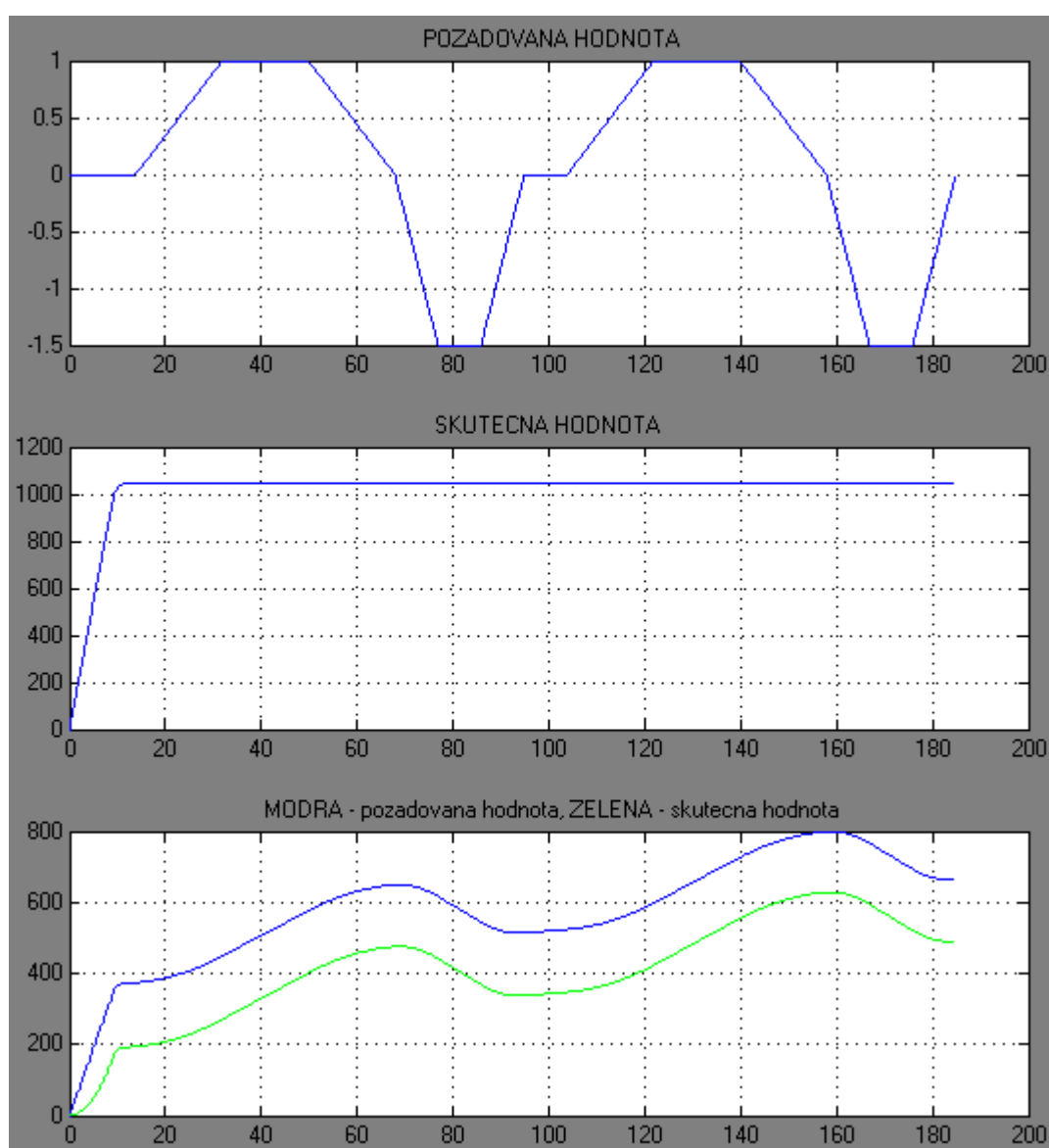
Do třetího bloku vstupují všechny vypočtené žádané a skutečné hodnoty. Uživatel po kliknutí levým tlačítkem myši vyvolá okno a pomocí rolovacího tlačítka si zvolí vstupní, výstupní a porovnávací charakteristiky (obr. 38). Všechny charakteristiky, které je možno zvolit, jsou vypsány v horní části vyvolaného okna.



Obrázek 38: Panel pro výběr vstupních, výstupních a porovnávacích charakteristik.

2.2.4 Zobrazení charakteristik

Čtvrtá a poslední část simulace slouží k zobrazení charakteristik. Zajišťuje ji blok „Scope“, který zobrazuje signály generované během simulace, které jsou zvolené ve třetím bloku. Blok obsahuje tři dílčí grafy (obr. 39), kde v prvním grafu se zobrazí vstupní žádaná hodnota, v druhém grafu výstupní skutečná hodnota a třetí graf slouží k porovnání požadovaných a skutečných hodnot. Na 1. grafu je vidět požadovaná dráha, na 2. grafu skutečné otáčky motoru a porovnání skutečné a žádané energie s rekuperací je na 3. grafu.



Obrázek 39: Zobrazení zvolených charakteristik

2.3 Akumulátorová elektrická lokomotiva 710.201-5 (CS 110A)



Obrázek 40: Akumulátorová lokomotiva 710.201-5 (CS 110A) [19]

Akumulátorová lokomotiva je třínápravové kolejové vozidlo, které je určené pro lehkou až středně těžkou práci na železnicích. Vzniklo přestavbou dieselhydraulické lokomotivy řady 710 (T334) z ČKD lokomotivka n. p. Praha. Původní je rám a pojezd. Výhodou je ekologie během provozu, a také velmi výrazné snížení provozních nákladů (za zmínku stojí náklady na palivo, údržba, aj.). Další výhodou je v jednodušší obsluha, přiznává pořizovací cena a nesmíme opomenout nízkou hlučnost. [19]

Konstrukce

Lokomotivu tvoří základní rameno a věžová kabina. Tato lokomotiva může být také řízena dálkově (až na 1000m). Lokomotiva je vybavena hlavní provozní brzdou EDB (elektrodynamická brzda). Proud generovaný trakčním elektromotorem vstupuje do střídače – usměrňovače a následně jde zpět do akumulátoru, kde dochází k tzv. rekuperaci (proces přeměny kinetické energie na využitelnou elektrickou energii při brzdění). [19]

Pohon

Lokomotiva je vybavena elektromechanickým přenosem výkonu. Zdrojem elektrického proudu je olověný trakční akumulátor (tab. 2). Akumulátor se dobíjí pomocí mobilního nabíječe, který má vysokofrekvenční nabíjecí princip. Proud je veden z trakčního akumulátoru

do vektorově řízeného střídače a odtud do cize chlazeného trakčního asynchronního elektromotoru s kotvou nakrátko. Krouticí moment je přenášen přes spojku do trakční redukční převodové skříně a z ní na skříně na nápravě. Lokomotiva dosahuje vysokého momentu elektromotoru při malých otáčkách díky plně vektorovému řízení trakčního střídače. [19]

Základní technické údaje pro simulaci:

Vybrané prvky lokomotivy pro simulaci	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	110	kW
Maximální provozní rychlost	20	Km/h
Hmotnost lokomotivy	48	t
Aerodynamický koeficient	1,2	-
Čelní plocha	13,11	m ²
Válivé tření	0,001	-
Moment setrvačnosti motoru	5,23	Kg.m ²
Moment setrvačnosti kola	55,87	Kg.m ²
Celkový převodový poměr	7.93	-
Účinnost převodovky	0,945	-
Poloměr kola	0,5	m
Počet hnaných náprav	3	-
Počet hnaných kol	6	-

Tabulka 1: Technické údaje lokomotivy 710.201-5 (CS 110A). [20], [21], [22]

Akumulátor:

Výrobce	Enersys s. r. o.; Hawker (Varta)
Typ	Trakční olověný 5 PzS 775
Počet článků	280
Jmenovité napětí	560 V
Max. napětí	672 V
Min. napětí	510 V
Kapacita	775 Ah
Hmotnost jednoho nosiče (35 článků)	1 500 kg

Tabulka 2: Parametry akumulátoru lokomotivy 710.201-5 (CS 110A) [20]



Obrázek 41: Pohled na reálnou akumulátorovou baterii z boku



Obrázek 42: Pohled na reálnou akumulátorovou baterii shora

2.4 Kapotová čtyřnápravová posunovací lokomotiva 730



Obrázek 43: Kapotová čtyřnápravová posunovací lokomotiva 730 [34]

Tato lokomotiva je čtyřnápravová a navržena pro střední až středně těžký posun. Byla vyrobena podnikem ČKD Praha v roce 1978 pod řadou 730 (T 457.0). Lokomotiva má vynikající trakční vlastnosti. V rychlosti 40 km/h vykazuje lokomotiva dobré tažné síly, ale při zvyšování rychlosti je už výkon neznatelný. [14]

Elektrická část

Lokomotiva má poměrně moderní elektrickou část. Trakční alternátor je typu TA 603 (jedná se o třífázový střídavý stroj). Proud z alternátoru je na výstupu usměrněn v trakčním usměrňovači. Skrze tento trakční usměrňovač jsou napájeny celkem čtyři trakční motory typu TE 005 E (resp. TE 015), které jsou zapojeny paralelně (jedná se o stejnosměrné sériové elektromotory). Chlazení elektromotorů zajišťují poháněné ventilátory. Palubní síť má napětí 110V stejnosměrných. Napájení zajišťují nikl-kadmiové akumulátorové baterie 75 NKS 150 o kapacitě 150Ah. [34]

Nikl-kadmiové akumulátory

Elektrody jsou vyrobeny z niklu a kadmiového pojiva. Akumulátory jsou lehké, malé a robustní. Disponují vysokým výkonem a výhodou je velký počet cyklu při nabíjení a vybíjení. Nevýhodou je hmotnost a paměťový efekt (při dobíjení zcela nevybité baterie se kapacita baterie snižuje). Při likvidaci musíme dbát na recyklaci, neboť obsahují jedovaté pojivo. [28]

Trakční motory ČKD TE 015

Je to stejnosměrný motor, čtyřpólový stroj s cizí ventilací. Konstrukčně je proveden jako tlapový. Tlapové ložisko je valivé s olejovým mazáním kluzných ploch. Rotor je z dynamoplechů a je spolu s komutátorem umístěn na hřídeli. Stator je ocelolitinový s odnímatelnými ložiskovými štíty. Chlazení je cizí s přívodem chladícího vzduchu do statoru na straně komutátoru. [10]

Jmenovité napětí	534 V
Jmenovitý proud	540 A
Jmenovitý výkon	291 KW
Jmenovité otáčky	795 ot./min
Účinnost při plném zatížení	0,91
Účinnost převodovky	0,98

Tabulka 3: Základní parametry trakčního motoru TE 015 [10]

Základní technické údaje pro simulaci:

Vybrané prvky lokomotivy pro simulaci	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	600	kW
Maximální provozní rychlost	80	Km/h
Hmotnost lokomotivy	68,4	t
Aerodynamický koeficient	1,2	-
Čelní plocha	12,86	m ²
Válivé tření	0,001	-
Moment setrvačnosti motoru	28,57	Kg.m ²
Moment setrvačnosti kola	55,87	Kg.m ²
Celkový převodový poměr	12,5	-
Účinnost převodovky	0,98	-
Poloměr kola	0,5	m
Počet hnaných náprav	4	-
Počet hnaných kol	8	-

Tabulka 4: Technické údaje lokomotivy 730 [34], [35]

2.5 Akumulátorová lokomotiva A219.0



Obrázek 44: Akumulátorová lokomotiva A219.0 [36]

Akumulátorová lokomotiva typu A219.0 je dvounápravová s DC trakčními motory pro lehkou posunovací službu. Je to kapotovaná lokomotiva s postranními ochozy a kabinou pro strojvedoucího. Používá se tam, kde je zapotřebí nehlukný provoz a čistý vzduch. Hlavní výhodou u tohoto druhu lokomotivy je okamžité nasazení a nezávislost na trolejovém vedení. Další výhodou je využívání elektrodynamické brzdy (EDB), která díky rekuperaci elektrické energie zvyšuje jízdní dosah lokomotivy. Díky vysoké kapacitě trakční baterie a možnosti okamžitého oživení může mít lokomotiva dojezd po rovině až 200 km. [27], [36]

Elektrická část

Zdrojem pro trakční motory je energie z trakční akumulátorové baterie VARTA 8x80 V – 3PzS 300 (viz tab. 6). Energie akumulátoru odpovídá cca 100 kg nafty. Dobíjena je během provozu rekuperační brzdou (popř. když stojí tak kabelem o napětí 3x380 V a proudem 63 A). Pulzní měnič osázený GTO tyristory zajišťuje regulaci výkonu jak v jízdním režimu, tak i v režimu brzdném. Jsou zde použity dva trakční motory ČKD TE015 C, které jsou zapojeny do série (jedná se o čtyřpólové stejnosměrné sériové elektromotory). Elektrodynamická brzda pracuje primárně v rekuperačním režimu

tak, že generovaná energie trakčními motory je využita pro dobíjení trakčního akumulátoru (dochází k prodloužení jízdního cyklu). Pomocná baterie je dobíjena přes statický měnič z trakční baterie. [36]

Základní technické údaje pro simulaci:

Vybrané prvky lokomotivy pro simulaci	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	72	kW
Maximální provozní rychlost	60	Km/h
Hmotnost lokomotivy	40	t
Aerodynamický koeficient	1,2	-
Čelní plocha	12,65	m ²
Válivé tření	0,001	-
Moment setrvačnosti motoru	3,42	Kg.m ²
Moment setrvačnosti kola	55,87	Kg.m ²
Celkový převodový poměr	9,85	-
Účinnost převodovky	0,98	-
Poloměr kola	0,5	m
Počet hnaných náprav	2	-
Počet hnaných kol	4	-

Tabulka 5: Technické údaje lokomotivy A219.0 [10], [36], [37]

Akumulátor:

Výrobce	Varta 8x80 V
Typ	Trakční olověný 3PzS 300
Provedení	Osmičláňkové
Kapacita	300 Ah
Napětí	640 V

Tabulka 6: Parametry akumulátoru A219.0 [27]

2.6 Energetická bilance provozu kolejového vozidla

Optimalizace spotřeby u akumulátorových lokomotiv se dá dosáhnout několika způsoby, které jsou uvedeny níže.

1. Nízká hmotnost

U nízké hmotnosti je třeba optimálně dimenzovat konstrukční části – např.: veškeré nosníky použité v rámu podvozku nebo spodku vozidla apod. mají mít své profily „tak akorát“. Principu lehké stavby při návrhu vozidla se dosahuje využitím plného napěťového stavu všech prvků konstrukce lokomotivy. Nesmí se také zapomenout, že příliš lehká lokomotiva může mít za následek horší jízdní adhezní vlastnosti (posun těžkých souprav), a tedy zásah do hmotnosti lokomotivy není vhodné řešení. [11]

2. Součinitel adheze

Adheze je schopnost přenášet tečné síly mezi otáčejícím se kolem a povrchem jízdní dráhy. Na adhezním principu se pohybují všechny dopravní prostředky, které se pohybují díky otáčejícím se kolům, na kterých spočívají svou konstrukcí, tj. silniční i kolejová vozidla. U silničních vozidel se adheze uplatňuje mezi stýkajícími se povrchy, kterými jsou pneumatika kola a povrch vozovky (asfalt, beton, tráva, apod.). U železničních vozidel se adheze uplatňuje v dotykové ploše mezi ocelovým kolem a ocelovou kolejnicí.

Součinitel adheze, by měl být co nejvyšší. Podléhá náhodným vlivům, ale částečně lze konstrukčně ovlivnit (ústřední pohon dvojkolí a použití špalíkové brzdy jako doplňkové brzdy pro čištění povrchu kola).

Zvýšení součinitele adheze dosáhneme tak, že v konstrukci nesmíme dopustit, aby se tažné kolo neodlehčovalo. U lokomotiv se to řeší vazbou mezi rámem podvozku a skříní vozidla, která je realizována např. šikmou tyčí k přenosu podélných sil.

Vliv adheze na spotřebu energie je následující. Při rekuperačním brzdění vrací energii do akumulátoru (je to přeměna pohybové energie na energii elektrickou) využijeme pouze to, co nám umožnila brzdná síla. Ta se přenáší zase jako tečná síla na obvod kol, a je tedy limitována adhezními poměry. Jednoduše řečeno, „když budou kola prokluzovat, vyrobí se málo energie“. [11], [12]

3. Vozidlový odpor

Působí proti tažné síle lokomotivy. Tento odpor by měl být co nejnižší. Velikost vozidlového odporu závisí na konstrukci lokomotivy a jejím stavu. Konstrukčně se dá ovlivnit následujícími způsoby:

- aerodynamickým tvarem čela lokomotivy,
- minimalizací válivého odporu,
- použitím válivých ložisek (místo kluzných).

Na valení kola po kolejnici si musíme dávat pozor. Mezi odborníky na konstrukci kolejových vozidel je jeden nepsaný zákon: „Vozidlo konstruované pro provozování na jistém typu železničních tratí je lepší než vozidlo univerzální, kterým se chce vyhovět všem tratím“. Hovoří se o směrových poměrech tratí. Vozidlo na přímé koleji potřebuje něco jiného než vozidlo v oblouku tratě.

Vznikají velké problémy vzájemného vztahu vozidla a koleje při průjezdu obloukem. Kinematické a silové důsledky tohoto procesu se uplatňují zejména z hlediska:

- bezpečnostní míry proti vykolejení,
- namáhání koleje i vozidla vodícími silami,
- opotřebení kolejnic a kol,
- energetických ztrát v důsledku zvýšení jízdních odporů,
- ekologických faktorů (údržba, hluk aj.).

4. Použití rekuperačního brzdění

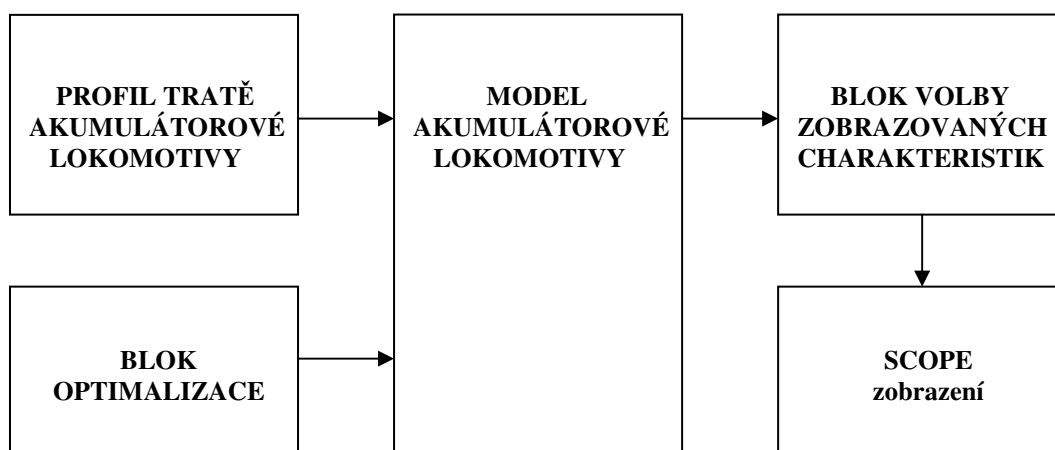
Při rekuperačním brzdění se vrací energie zpět do akumulátorové baterie. Můžeme říci, že to je přeměna kinetické (pohybové) energie na energii elektrickou. Využije se pouze ta část energie, která byla vyvinuta při brzdění. [13]

5. Všechna dvojkolí by měla být hnací (100 % adhezní tíha)

6. Adaptivní zrychlení a optimalizace rychlosti

2.7 Návrh optimalizace spotřeby akumulátorové lokomotivy

Poslední částí je navrhnutí optimalizace spotřeby. Jak bylo zmíněno výše, spotřeba se dá změnit, za jistých okolností hmotností, součinitelem adheze, vozidlovým odporem, použitím rekuperačního brzdění, podmínkou všech dvojkolí hnacích, a také pomocí adaptivního zrychlení a optimalizaci spotřeby. Hlavní blokové schéma je vidět na obr. 43.



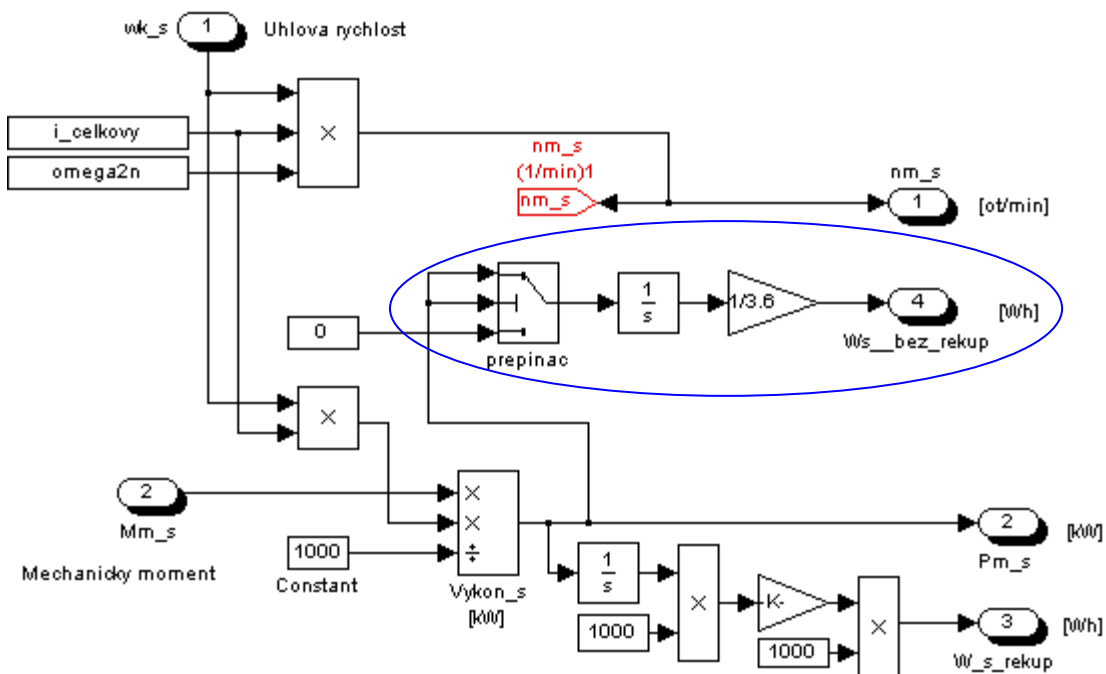
Obrázek 45: Blokové schéma s optimalizací spotřeby energie

V modelu je zohlednění předposledního a posledního bodu. Předposlední bod se zabýval použitím rekuperačního brzdění. Tato metoda už byla použita v úvodním schématu. Výsledná energie tudíž nebyla pouze spotřebovaná, ale už optimalizovaná. Musela se tedy z této už optimalizované energie získat pouze energie spotřebovaná. Simulační schéma, kde se získá pouze energie spotřebovaná, je na obr. 46 (přesněji v modrém kruhu).

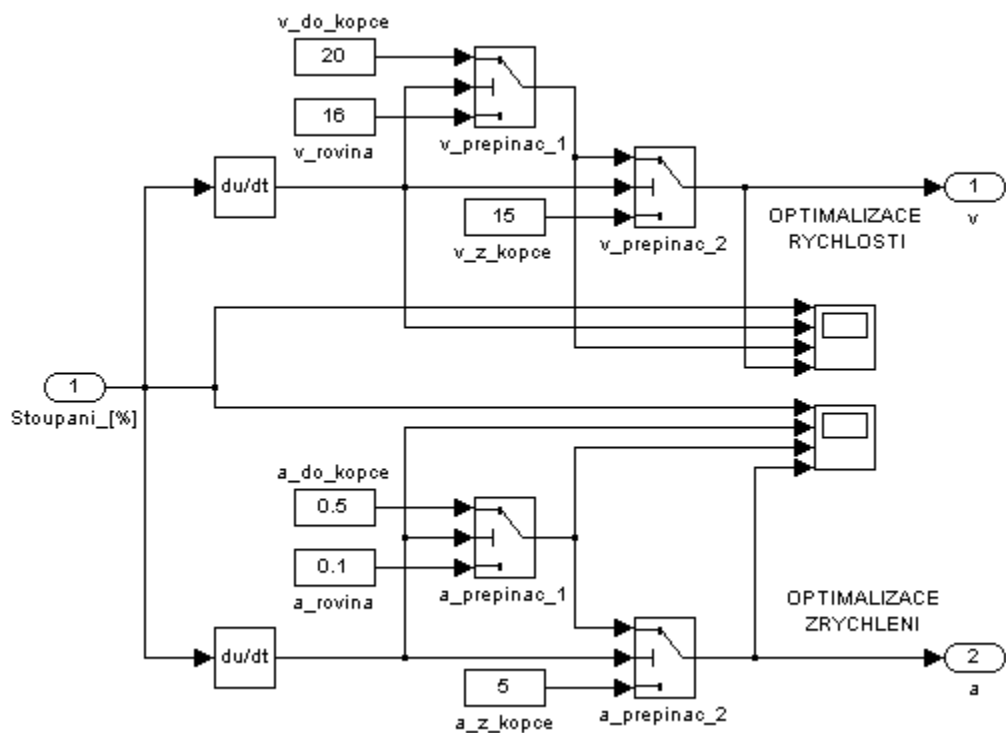
Poslední bod se zabýval optimalizací spotřeby pomocí adaptivního zrychlení a optimalizace spotřeby. Použil se známý „Model spotřeby energie akumulátorové lokomotivy“, který nahradil blok žádaných hodnot *blokem optimalizace* (obr. 45). Vnitřní struktura bloku optimalizace je na obr. 47.

Blok optimalizace řeší problematiku správného vyhodnocení rychlosti a zrychlení. Vstupem do obou částí (optimalizace rychlosti a optimalizace zrychlení) je stoupání. Toto stoupání se pro obě části derivuje. Rozhodující podmínkou při optimalizaci je blok „Switch“, do kterého vstupuje derivace stoupání. Tento blok (switch) pracuje na podmínce, že pokud

je splněna podmínka na vstupu 2, tak se spíná vstup 1, pokud není splněna podmínka na vstupu 2, tak se spíná vstup 3.



Obrázek 46: Vnitřní struktura výpočtu skutečných hodnot a získání spotřebované energie



Obrázek 47: Vnitřní struktura bloku optimalizace spotřeby pomocí rychlosti a zrychlení

2.8 Porovnání energií (bez optimalizace a s optimalizací)

AKUMULÁTOROVÁ LOKOMOTIVA 710.201-5 (CS 110A)						
20km/h; 0,5m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1273	184,9	1311	185,1	946	184,9
<i>Energie + rekuperace</i>	1150	184,9	1150	185,1	596,6	184,9
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1150	184,9	1013	241,5	574,2	231,7
20km/h; 0,2m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1229	192	1309	192	943,5	192
<i>Energie + rekuperace</i>	1148	192	1148	192	594	192
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1148	192	1013	241,5	568,8	233,7
15km/h; 0,5m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1159	243,7	1183	243,7	817,6	243,7
<i>Energie + rekuperace</i>	1011	243,7	1011	243,7	457,3	243,7
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1011	243,7	912,7	360,7	441,6	320,1
15km/h; 0,2m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1131	249,1	1182	249,1	816,4	249,1
<i>Energie + rekuperace</i>	1010	249,1	1010	249,1	456,1	249,1
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1010	249,1	912,7	360,7	438,3	321,9

Tabulka 7: Výsledné hodnoty lokomotivy 710.201-5 (CS 110A)

KAPOTOVÁ ČTYŘNÁPRAVOVÁ LOKOMOTIVA 730						
20km/h; 0,5m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1780	186	1845	186	1343	186
<i>Energie + rekuperace</i>	1613	186	1613	186	852,1	186
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1613	186	1412	240,9	828,1	234,7
20km/h; 0,2m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1709	194,8	1842	194,8	1340	194,8
<i>Energie + rekuperace</i>	1610	194,8	1610	194,8	848,8	194,8
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1610	194,8	1412	240,9	818,4	237,7
15km/h; 0,5m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1609	244,5	1650	244,5	1148	244,5
<i>Energie + rekuperace</i>	1407	244,5	1407	244,5	646,4	244,5
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1407	244,5	1263	360,5	629,2	322,1
15km/h; 0,2m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1563	251,2	1648	251,2	1146	251,2
<i>Energie + rekuperace</i>	1406	251,2	1406	251,2	644,9	251,2
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	1406	241,2	1263	360,5	623,7	324,5

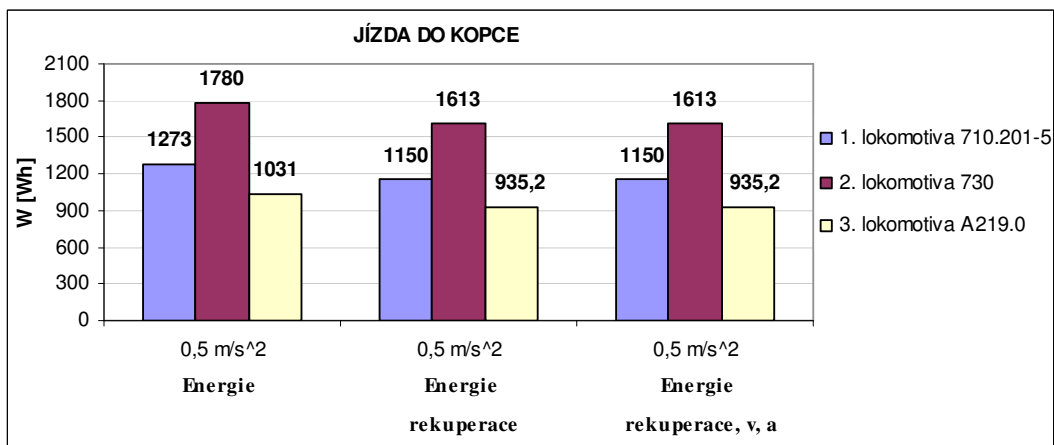
Tabulka 8: Výsledné hodnoty lokomotivy 730

AKUMULÁTOROVÁ LOKOMOTIVA A219.0						
20km/h; 0,5m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	1031	184,8	1061	184,9	767,9	184,8
<i>Energie + rekuperace</i>	935,2	184,8	935,1	184,9	490,3	184,8
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	935,2	184,8	819,1	242,1	468,9	231,6
20km/h; 0,2m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	996,3	191,9	1059	191,9	765,6	191,9
<i>Energie + rekuperace</i>	932,8	191,9	932,8	191,9	488	191,9
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	932,8	191,9	819,1	242,1	464,3	233,6
15km/h; 0,5m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	935,7	243,7	954,9	243,7	661,4	243,7
<i>Energie + rekuperace</i>	818,5	243,7	818,5	243,7	373,6	243,7
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	818,5	243,7	735,1	361,3	358,6	320
15km/h; 0,2m/s²	DO KOPCE		Z KOPCE		KOMBINACE	
Typ spotřeby	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]	E_s [Wh]	t [s]
<i>Energie</i>	913,1	249,1	953,9	249,1	660,3	249,1
<i>Energie + rekuperace</i>	817,4	249,1	817,4	249,1	372,5	249,1
<i>Energie + rekuperace + rychlost + zrychlení</i>	817,4	249,1	735,1	361,3	356,1	321,9

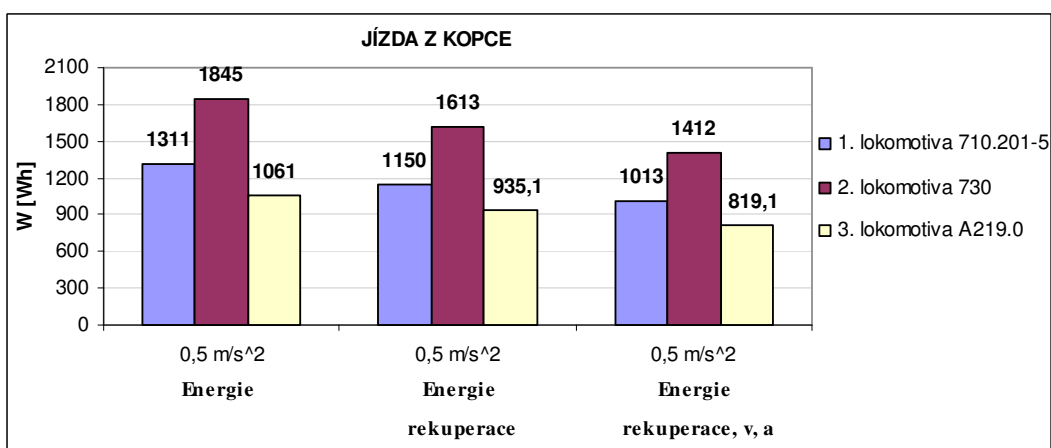
Tabulka 9: Výsledné hodnoty lokomotivy A219.0

2.9 Grafické porovnání výsledků bez optimalizace a s optimalizací

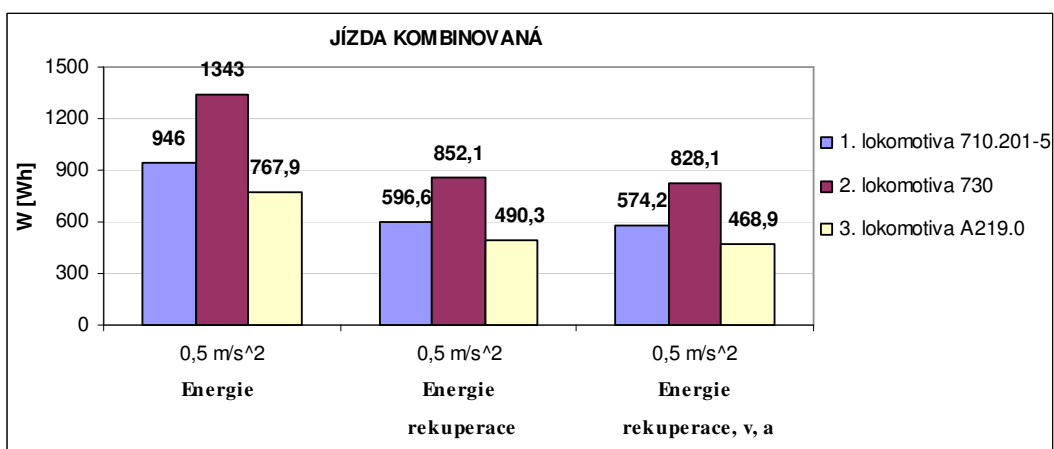
Pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$:



Graf 1: Jízda do kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$

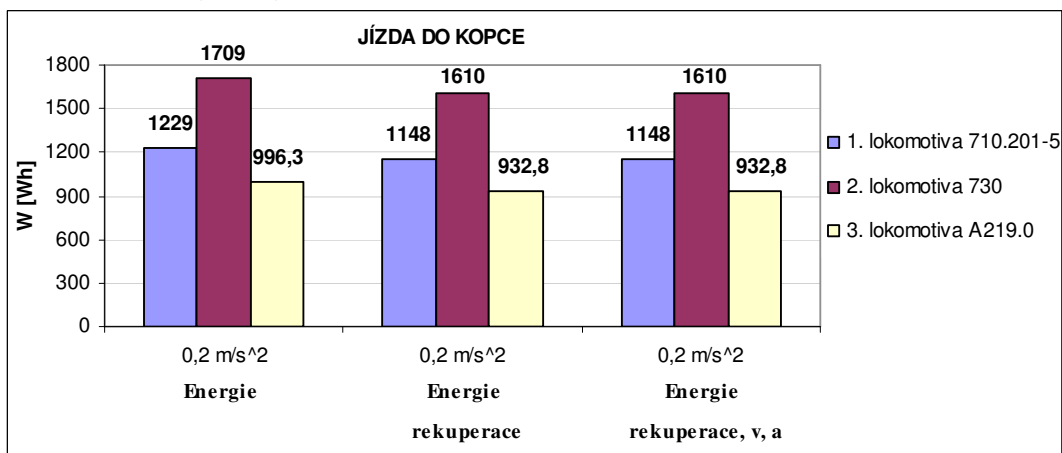


Graf 2: Jízda z kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$

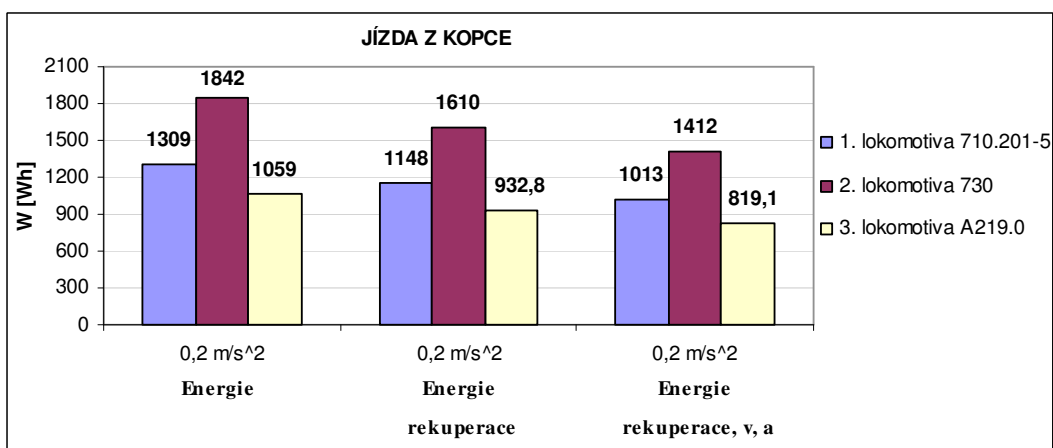


Graf 3: Jízda kombinovaná pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$

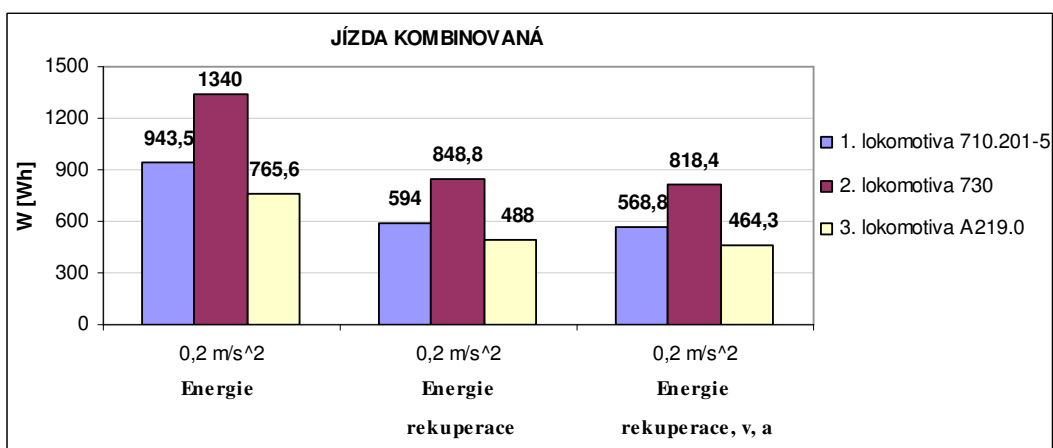
Pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$:



Graf 4: Jízda do kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$

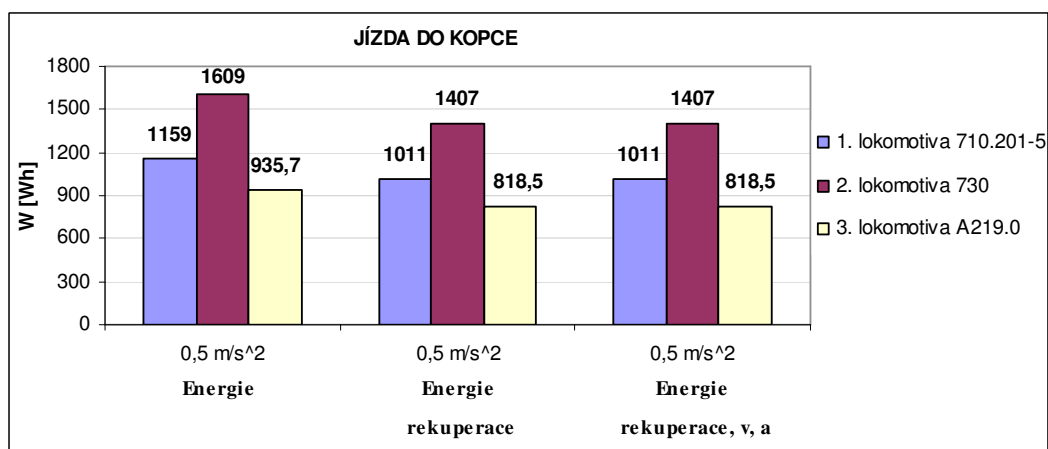


Graf 5: Jízda z kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$

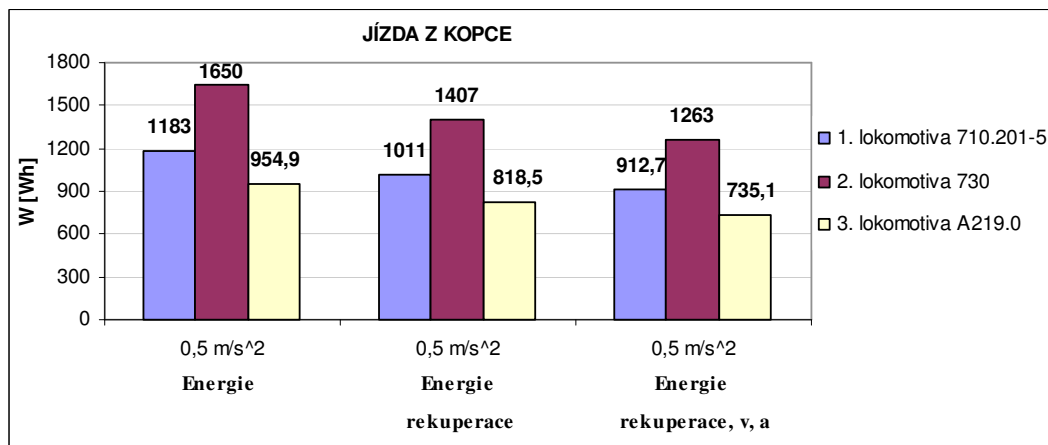


Graf 6: Jízda z kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$

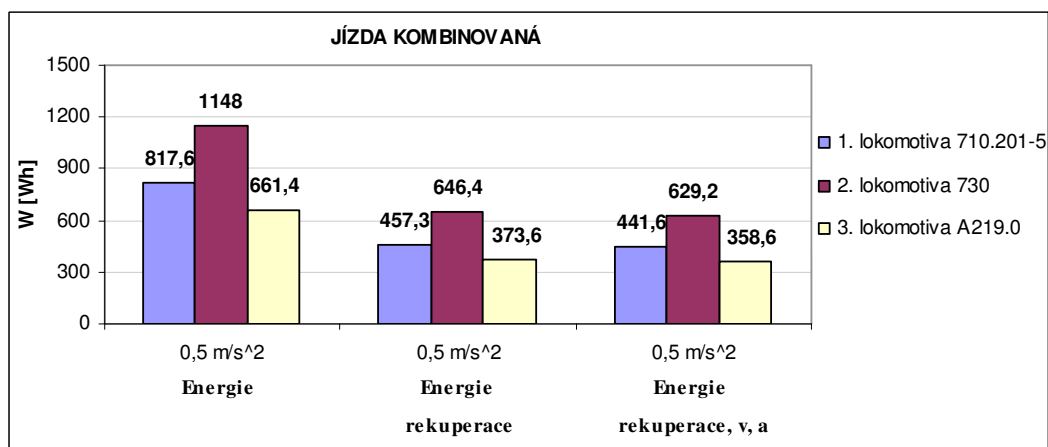
Pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$:



Graf 7: Jízda do kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$

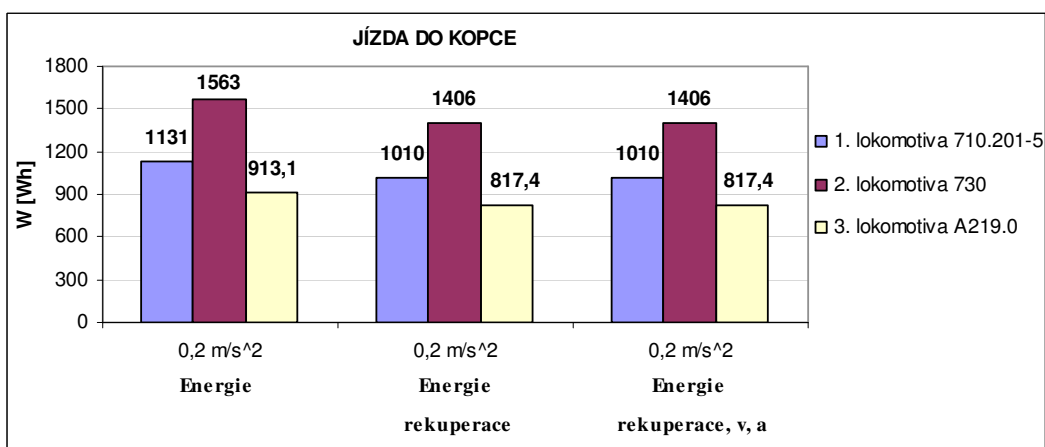


Graf 8: Jízda z kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$

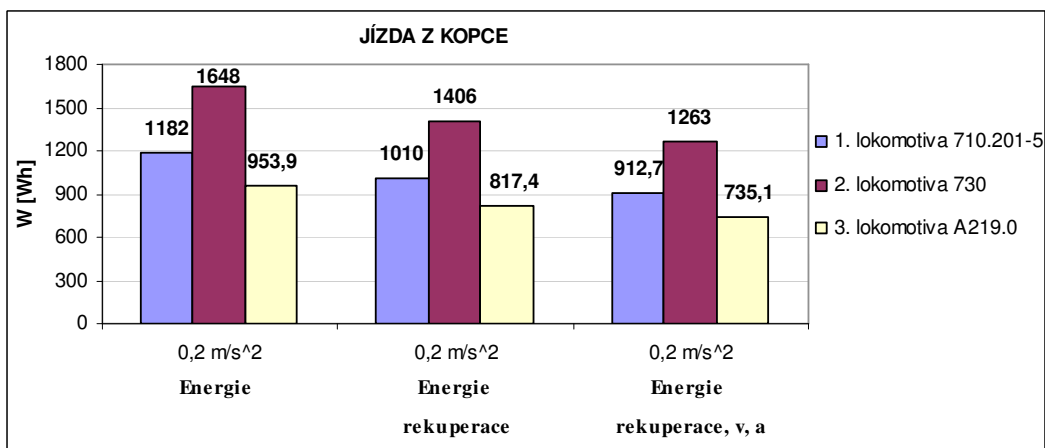


Graf 9: Jízda kombinovaná pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$

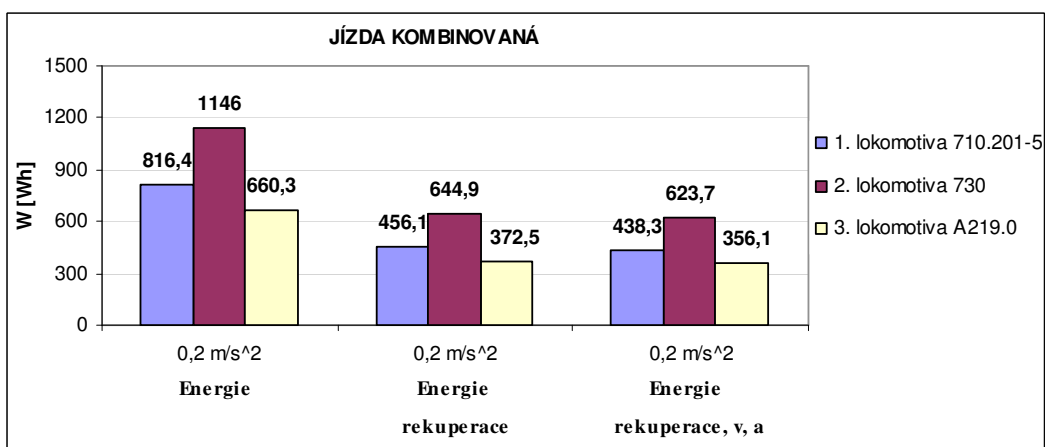
Pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$:



Graf 10: Jízda do kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$



Graf 11: Jízda z kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$



Graf 12: Jízda kombinovaná pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$

3. Experimentální výsledky

Fyzické měření na lokomotivě 710.201-5 v ARCELORMITTALU

Dne 24. 4. 2012 proběhlo fyzické měření na lokomotivě 710.201-5 v podniku ARCELORMITTAL za spolupráci p. Kývaly (firma DODÁVKY AUTOMATIZACE) a p. Hrušky (firma ARCELORMITTAL). Toto měření posloužilo k porovnání výsledků získaných ze simulačního modelu.



Obrázek 48: Ukázka drážního tělesa sloužící pro měření

Úkolem bylo rozjet akumulátorovou lokomotivu z klidové polohy na konstantní rychlost 20 km/h po určité dráze s požadovaným zrychlením. Jelikož je lokomotiva určitým způsobem nastavena, rychlost 20 km/h nebyla z technických důvodů dosažena. Lokomotiva je navržena na maximální rychlost 20 km/h, avšak její skutečná rychlost byla 17 km/h z důvodu jejího stálého projektování vývoje, kdy byly otáčky prozatím nastaveny pomocí zadávání frekvence v kabině strojvedoucího. Maximální dosažená konstantní rychlost byla pouze 17 km/h. Ujetá dráha byla 1 km s minimálním stoupáním tratě (lokomotiva nerekupovala) a se zrychlením $0,45 \text{ m/s}^2$. Cílem měření bylo získat údaje o spotřebované energii a porovnat je se simulačními výsledky.

Rychlost	v [km/h]	17
Dráha	s [m]	1000
Čas při ujetí 1 km	t [s]	213
Stav baterie při startu	Q ₁ [As]	300 300
Stav baterie při dosáhnutí 1 km	Q ₂ [As]	292 351
Napětí na baterce	U _{bat} [V]	515

Tabulka 10: Získané hodnoty z akumulátorové lokomotivy v Arcelormittalu

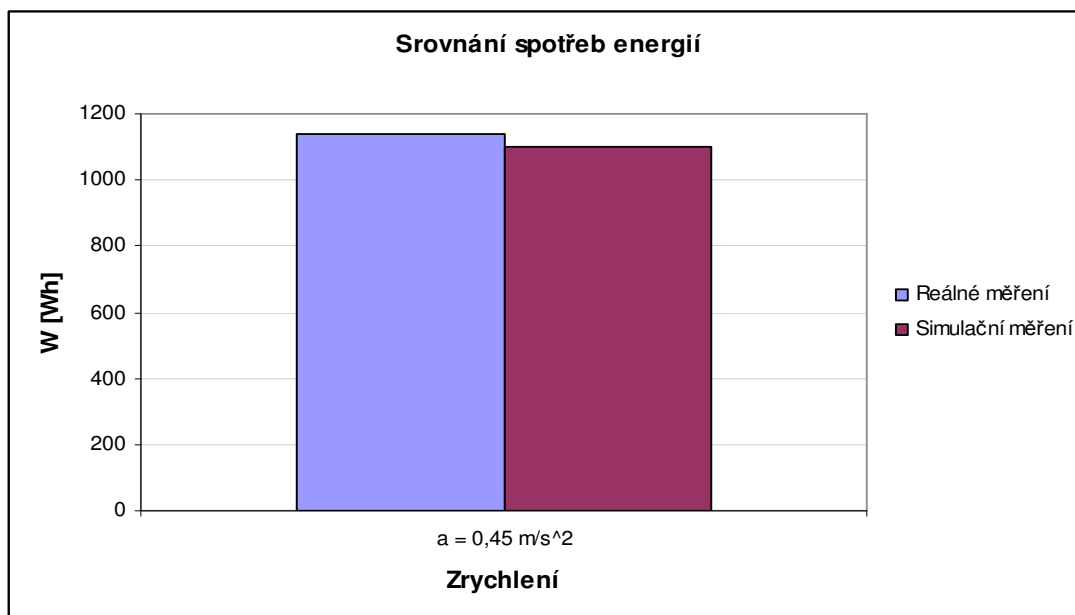
Spotřebovaný elektrický náboj

$$I_{celk} = I_{poč} - I_k = 300300 - 292351 = 7949As$$

Práce vykonaná baterií, spotřebovaná energie

$$W_{bat} = I_{celk} \cdot U_{bat} = 7949 \cdot 515 = 4093735Ws \quad [Ws = J]$$

$$W_{spot} = \frac{W_{bat}}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{4093735}{3,6 \cdot 10^6} = 1,137kWh$$



Graf 13: Porovnání reálných a simulačních hodnot

Nasimulovaná lokomotiva má spotřebu energie 1 102 Wh, zatímco lokomotiva, na níž bylo provedeno měření, měla spotřebu 1 137 Wh. Rozdíl energií je 35 Wh. Po komparaci výsledků se prokázala malá odlišnost. Obě lokomotivy jely po trati s mírným stoupáním, po dráze 1000 m, se zrychlením $0,45\text{m/s}^2$. Jelikož reálná lokomotiva po trati překonávala pouze odpory, které na ni působily, nenastávala rekuperace a kapacita v baterii klesala. V simulačním profilu nebylo počítáno s oblouky a výhybkami tratí. Zatímco ve skutečném modelu započítány jsou a tento parametr se v určité míře projeví v koncové spotřebě energie.

Závěr

Problematika akumulátorových vozidel bývá často řešeným tématem. V podstatě se jedná o vozidla, která jsou nezávislá na elektrické trakci, neprodukují škodliviny do ovzduší a svou hlučností nenarušují okolí. S rostoucí cenou pohonných látek se dá konstatovat, že ekonomika provozu těchto lokomotiv a poptávka po nich bude určitým tempem růst. Použití hybridních vozidel, ať už se jedná o osobní nebo nákladní automobily či lokomotivy, je výhodné zejména ve znečištěném prostředí.

Nezávislým zdrojem hybridních vozidel mohou být například akumulátory (olověné, nikl-kadmiové, lithiové aj.). Chápeme je jako určitý zdroj energie, který se dá opakovaně dobíjet. Dalšími typy zdrojů elektrické energie mohou být např. palivové články, které uvolňují elektřinu při chemických reakcích či fotovoltaická energie, kde dochází k přeměně elektromagnetického záření viditelného spektra na elektrickou energii. Za zmínku stojí i použití ultrakapacitorů, které sice uskladní energií pouze na krátkou dobu, ale své uplatnění našly zejména jako pomocný zdroj elektrické energie v dynamických režimech vozidel. Všechny výše zmíněné zdroje mají své specifické vlastnosti, parametry a použití v různých odvětvích automobilového průmyslu.

V diplomové práci byly navrženy simulační modely, které měřily spotřebovanou energii pro použité drážní profily lokomotiv. Spotřebovaná energie se porovnávala s navrženými optimalizacemi pro úsporu spotřeby energie. Optimalizace byly řešeny na základě rozhodujících podmínek. Sledovanými parametry byly rychlosti a zrychlení při stoupání, klesání a jízdě po rovině, dále pak množství rekuperované energie.

V simulačním modelu byly zvoleny tři základní jízdní profily. Profil jízdy do kopce, z kopce a kombinovaná jízda. Dalším společným kritériem byla kombinace rychlostí (20 km/h; 15 km/h), zrychlení ($0,5 \text{ m/s}^2$; $0,2 \text{ m/s}^2$) a neměnná délka trati (1000 m). Lokomotivy byly srovnávány z hlediska celkové energie, spotřebované energie s rekuperací a spotřebované energie s rekuperací při optimalizaci rychlosti a zrychlení. Výsledky jsou patrné z tabulek na stranách 58 - 60 a grafů na stranách 61 - 64. Z výsledků simulací plyne, že nejlepší spotřebu při třech jízdních profilech má akumulátorová lokomotiva A219.0. Hlavní nevýhodou optimalizace zaměřené na spotřebu energie je prodloužení časových intervalů při posunech. Například při jízdě z kopce lokomotiva přibrzdžovala (energie se rekuperovala do

akumulátorové baterie) nebo při menším žádaném zrychlení se lokomotiva rozjížděla pomaleji, čímž ušetřila energii, ale do cíle došla za delší časový úsek.

Výsledkem mých měření na skutečném drážním profilu akumulátorové lokomotivy 710.201-5 byla spotřebovaná energie, kterou jsem využil ve svých výpočtech a porovnal s nasimulovanou hodnotou. Došel jsem k závěru, že rozdíl byl zanedbatelný (v jednotkách Wh).

Díky této diplomové práci jsem mohl komunikovat s lidmi, kteří jsou odborníci řešené problematiky. Poskytovali mi cenné informace v oblasti drážních vozidel a jejich konstrukce. Za osobním přínosem rovněž považuji získání uceleného pohledu na vytváření simulačních schémat ve vývojovém prostředí Matlab Simulink.

LITERATURA

1. **POKORNÝ, Pavel.** *Construction of the optimal control strategy for an electric-powered train.* Vědecká knihovna Olomouc, 2010. ISBN 978-80-214-4108-8.
2. **DRÁBEK, Jiří.** *Dynamika a energetika elektrické trakce.* Vědecká knihovna Olomouc, 1987. ISBN 817042.
3. **DANZER, Jiří.** *Elektrická trakce: 1. Přehled problematiky.* Plzeň: Vědecká knihovna Olomouc, 2009. ISBN 978-80-7043-769-8.
4. **VLK, František.** *Dynamika motorových vozidel.* 2. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003. ISBN 80-239-0024-2.
5. **BOSÁČEK, Josef.** *Současné možnosti alternativních pohonů hnacích vozidel: Historie a nekonvenční lokomotivy na našich kolejích.* [online]. [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: http://www.railvolution.net/czechraildays/2008/seminare/kv_08.pdf
6. **KUBÍČEK, Milan.** *Aerodynamika vozidel.* Pardubice, 2011. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/39246/1/KubicekM_Aerodynamika%20vozidel_GK_2011.pdf. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Gabriela Korecová, Ph, D.
7. **KOSTKA, Tomáš, CHMIEL a NAVRÁTIL.** *Užití elektrické energie: Elektrická trakce* [online]. Havířov - Šumbark, 2004 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z: http://www2.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/uee/trakce_teplo_svetlo.pdf. Skripta.
8. **ZAPTATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR.** *Matlab pro začátečníky.* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-095-4.
9. **VRBKA, Michal.** *Modelování lineárních pohonů s DC motorem pro potřeby řízení.* Brno, 2009. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18791. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph, D.
10. **ČERNOHORSKÝ, Tomáš.** *Hybridní posunovací lokomotiva.* Pardubice, 2009. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34072/1/CernohorskyT_Hybridni_posunovaci_JS_2009.pdf. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Jiří Štěpánek.

11. **ŠVEJNOCH, Vladimír a kol.:** Teorie kolejových vozidel. ČVUT, Praha 1991, 251 s., ISBN 80-01-00622-0,
12. **IZER, Jiří.** Kolejové vozy - dodatek. Alfa, Bratislava 1988, 88 s., ISBN 063-742-88,
13. **POHL Rudolf, NOVOTNÝ Ctirad.** Železniční vozidla I. ČVUT, Praha 2002, 288 s., ISBN 80-01-02622-1,
14. **PROCHÁZKA, Ivan.** Internetový technická magazín: 730 (T457.0). [online]. 2007[cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://techmag.valka.cz/zel_p_730.htm#730td
15. **VÝKRUTA, Vladivoj.** Týdeník Českých drah - ŽELEZNIČÁŘ: Elektrizace pražského uzlu. [online]. 2009, 12/2009 [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: http://www.cd.cz/old/TCD2009/9_12elek.htm
16. **MLYNAŘÍK, Ladislav a Jaroslav NOVÁK.** Studie regionálního železničního provozu s akumulátorovým vozem a solárním napájením v podmínkách ČR. *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. 2011, 32/2011, s. 14 [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/vts/CLANKY/vts32/3204.pdf>
17. **MIKLICA, Martin.** *Design posunovací lokomotivy*. Brno, 2011. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1400. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. akad. soch. Ladislav Křenek, Ph, D.
18. KURZYCZ. ArcelorMittal Ostrava testuje první akumulátorovou lokomotivu. In: HONUSOVÁ, Ilona. [online]. [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://zpravy.kurzy.cz/279638-arcelormittal-ostrava-testuje-prvni-akumulatorovou-lokomotivu/>
19. Hnací kolejová vozidla, energetika, projekce a inženýring: Kolejové tahače a lokomotivy KT. ARROW LINE, a. s. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.arrowline.cz/kolejova-vozidla-tahace.html>
20. DATASHEET. Hlavní technické údaje: Akumulátorová lokomotiva 710.201-5 (CS 110A). [online]. s. 9 [cit. 2012-03-20].
21. DATASHEET. Dutchi motors B. V.: DMI-315 L6, IM B3. [online]. s. 21 [cit. 2012-03-18].
22. DATASHEET. Dutchi motors B. V.: DMI-315 L6, IM B3. [online]. s. 2 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.camismotors.com/pdf/G%201106.pdf>
23. INTERNETOVÝ PORTÁL ELEKTROTECHNIKA. *Elektrická trakce* [online]. 2009. vyd. [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=4978>

24. Autobusy: Kompletní řada vozidel od výrobce Bredamenarinibus. [online]. [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.itcgroup.cz/vyrobky/autobusy>
25. ŠKODA ELECTRIC S. R. O. ŠKODA 25Tr Irisbus. [online]. [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.bmhd.cz/archiv/prospekty/docs/25Tr-CZ.pdf>
26. Skripta trakce z UE: Trakce [online]. Valašské Meziříčí, 2006 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/enz%20trakce%20skripta.pdf>. Skripta.
27. SKD TRADE, A. S. Lokomotivy A219.0. [online]. [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.skd.cz/lokomotivy/A219.htm>
28. BOSCH. Slovník: Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd). [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.bosch-do-it.cz/dom%C3%A1c%C3%ADkutil/dom%C3%A1c%C3%ADkutilstv%C3%AD/slovn%C3%ADk/nikl-kadmiov%C3%A9-akumul%C3%A1tory-nicd.shtml?alpha=78>
29. **ROVENSKÝ, Pavel**. Skutečný a ideální pohyb vlaku. [online]. [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: <http://www.masinky.ic.cz/technika/jizda.pdf>
30. MATLAB, Simulink. [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/>
31. **PLOCEK, Robert**. TRANSPRAPID. [online]. 2009, s. 10 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://vrt.fd.cvut.cz/data/x1zs/transrapid.pdf>
32. THE PHYSICS CLASSROOM. Mass as a Measure of the Amount of Interia. [online]. [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: <http://www.physicsclassroom.com/class/newtlaws/u2l1b.cfm>
33. **ŠVESTKA, David**. Atlas lokomotiv: Vývoj a výroba. [online]. [cit. 2011-12-20]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-718.html>
34. **ŠVESTKA, David**. Atlas lokomotiv: 730I T 457.0. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-730.html>
35. Typové výkresy lokomotiv: 730. [online]. 2012[cit. 2012-03-26]. Dostupné z: <http://www.nakresiloko.estranky.sk/clanky/730.html>
36. **ŠVESTKA, David**. Atlas lokomotiv: A219.0. [online]. [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-A219.html>
37. Typové výkresy lokomotiv: A219.0. [online]. 2012[cit. 2012-03-27]. Dostupné z: http://www.nakresiloko.estranky.sk/clanky/a219_0.html

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Akumulátorová posunovací lokomotiva řady E 407.001 [15]	12
Obrázek 2: Koncepce elektrické výzbroje akumulátorové lokomotivy	13
Obrázek 3: Motor A314 [19]	14
Obrázek 4: Rozvaděč s hlavním rozpojovačem [19]	14
Obrázek 5: Minibus s elektrickým pohonem ZEUS [24].....	15
Obrázek 6: ŠKODA 25 Tr IRISBUS [25]	16
Obrázek 7: Vlak MAGLEV ve stanici. [9]	16
Obrázek 8: Transrapid v Německu. [31].....	17
Obrázek 9: Princip dieselelektrické lokomotivy	19
Obrázek 10: Princip akumulátorové vozby.....	20
Obrázek 11: Princip setrvačnickové vozby	20
Obrázek 12: Princip napájení městské dopravy. [23]	21
Obrázek 13: Schéma napájení hlavní dráhy stejnosměrným napětím 1,5 kV [23]	21
Obrázek 14: Schéma napájení hlavní dráhy 1f střídavé soustavy 25 kV, 50 Hz. [23].....	22
Obrázek 15: Zjednodušená představa vlaku jako hmotného bodu.....	23
Obrázek 16: Rozdělení podle místa výskytu.....	24
Obrázek 17: Složka jízdního odporu z tření v ložiskách.....	26
Obrázek 18: Souřadný systém pro aerodynamická měření sil a momentů. [6], [17]	27
Obrázek 19: Odpor ze stoupání.....	29
Obrázek 20: Čtyři základní fáze jízdy.....	31
Obrázek 21: Trakční charakteristiky a omezení adhezi pro lokomotivu	32
Obrázek 22: Zátěžový diagram.....	33
Obrázek 23: Použité akumulátorové lokomotivy.....	35
Obrázek 24: Blokové schéma simulační úlohy akumulátorové lokomotivy	35
Obrázek 25: Vnitřní struktura bloku profilu tratě	36
Obrázek 26: Panel pro výběr jízdního profilu.....	36
Obrázek 27: Panel pro zadávání konstant a výběr trakční charakteristiky	37
Obrázek 28: Vnitřní struktura modelu akumulátorové lokomotivy	38
Obrázek 29: Vnitřní struktura a výpočet hnací síly	39
Obrázek 30: Vnitřní struktur adaptivního zrychlení	40
Obrázek 31: Vnitřní struktura výpočtu hnací a odporové síly	40
Obrázek 32: Vnitřní struktura výpočtu výkonu a energie.....	41

Obrázek 33: Vnitřní struktura bloku omezující moment	41
Obrázek 34: Dílčí simulace sloužící k nasimulování, přepínání trakčních charakteristik	42
Obrázek 35: Okno zadávání hodnot trakční charakteristik.	43
Obrázek 36: Zobrazení nadefinovaných hodnot, úprava hodnot	43
Obrázek 37: Vnitřní struktura bloku dynamiky akumulátorové lokomotivy	44
Obrázek 38: Panel pro výběr vstupních, výstupních a porovnávacích charakteristik.....	45
Obrázek 39: Zobrazení zvolených charakteristik.....	46
Obrázek 40: Akumulátorová lokomotiva 710.201-5 (CS 110A) [19]	47
Obrázek 41: Pohled na reálnou akumulátorovou baterii z boku	49
Obrázek 42: Pohled na reálnou akumulátorovou baterii shora	49
Obrázek 43: Kapotová čtyřnápravová posunovací lokomotiva 730 [34].....	50
Obrázek 44: Akumulátorová lokomotiva A219.0 [36]	52
Obrázek 45: Blokové schéma s optimalizací spotřeby energie.....	56
Obrázek 46: Vnitřní struktura výpočtu skutečných hodnot a získání spotřebované energie	57
Obrázek 47: Vnitřní struktura bloku optimalizace spotřeby pomocí rychlosti a zrychlení.....	57
Obrázek 48: Ukázka drážního tělesa sloužící pro měření.....	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické údaje lokomotivy 710.201-5 (CS 110A). [20], [21], [22]	48
Tabulka 2: Parametry akumulátoru lokomotivy 710.201-5 (CS 110A) [20]	48
Tabulka 3: Základní parametry trakčního motoru TE 015 [10]	51
Tabulka 4: Technické údaje lokomotivy 730 [34], [35]	51
Tabulka 5: Technické údaje lokomotivy A219.0 [10], [36], [37]	53
Tabulka 6: Parametry akumulátoru A219.0 [27]	53
Tabulka 7: Výsledné hodnoty lokomotivy 710.201-5 (CS 110A)	58
Tabulka 8: Výsledné hodnoty lokomotivy 730.....	59
Tabulka 9: Výsledné hodnoty lokomotivy A219.0	60
Tabulka 10: Získané hodnoty z akumulátorové lokomotivy v Arcelormittalu	66

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Jízda do kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$	61
Graf 2: Jízda z kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$	61
Graf 3: Jízda kombinovaná pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$	61
Graf 4: Jízda do kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$	62
Graf 5: Jízda z kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$	62
Graf 6: Jízda z kopce pro $v = 20 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$	62
Graf 7: Jízda do kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$	63
Graf 8: Jízda z kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$	63
Graf 9: Jízda kombinovaná pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,5 \text{ m/s}^2$	63
Graf 10: Jízda do kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$	64
Graf 11: Jízda z kopce pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$	64
Graf 12: Jízda kombinovaná pro $v = 15 \text{ km/h}$, $a = 0,2 \text{ m/s}^2$	64
Graf 13: Porovnání reálných a simulačních hodnot	66

PŘÍLOHY

Příloha I	Technické údaje akumulátorové lokomotivy 710.201-5
Příloha II	Korefův diagram